



Aplikace polymerních materiálů pro aditivní výrobu tvarových částí vstřikovacích forem

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Ondřej Helis

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Aplikace polymerních materiálů pro aditivní výrobu tvarových částí vstřikovacích forem

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Helis**
Osobní číslo: S17000238
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše konstrukce vstřikovacích forem, aditivních technologií a procesů, materiálů.
2. Problematika aplikace aditivních technologií při výrobě tvarových částí forem.
3. Návrh dílu a vstřikovací formy pro aditivní technologii.
4. Příprava dat, výroba vzorků, odzkoušení a experimentální měření.
5. Diskuze výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 50
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. www.etul.publi.cz, 2015. ISBN iOS: 978-80-88058-72-4, ISBN Android: 978-80-88058-73-1.
- [2] ZELENÝ, P. a P. POKORNÝ. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping* – učební text. Liberec: TUL, 2012. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2516>.
- [3] GEBHARDT A. *Understanding Additive Manufacturing*. Munich: Verlag, 2011. ISBN 978-3-446-42552-1.

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

3. června 2020

Bc. Ondřej Helis

Anotace

Diplomová práce se zabývá možností tvorby vstřikovací formy s temperačním chlazením vytištěné aditivní technologií FDM kdy pro materiál formy je použit teplotně odolným materiál obsahující částice mědi. Také je zkoušena funkčnost a životnost vytvořené formy. Teoretická část obsahuje základní informace o procesu vstřikování plastů a složení vstřikovací formy. Dále teoretická část obsahuje přehled aditivních technologií a materiálů používaných pro jejich tisk.

Klíčová slova: aditivní technologie, vstřikovací forma, HTPLA+60%Cu

Annotation

This thesis focuses on the possibility of creating an FDM printed injection mold with temperature cooling. Heat-resistant material containing copper particles is used for the mold material. Functionality and durability of 3D printed injection mold is tested. The theoretical part contains basic information about the plastic injection process and the composition of the injection mold. Furthermore, the theoretical part contains an overview of additive technologies and their materials.

Key words: additive technology, injection mold, HTPLA+60Cu

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, FEng. za jeho ochotu, pomoc při vypracování a za strávený čas během konzultací. Dále bych rád poděkoval kolegům z firmy Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. to především Ing. Vítězslavu Brožkovi za ochotu a čas při konzultování a tisku vložky formy a dále Ing. Radimu Ždárskému a Ing. Ondřeji Vohlídalovi při následném zkoušení na vstřikovacím zařízení a poskytnutých připomínek a rad při tvorbě této práce.

Obsah

1. Úvod.....	14
2. Teoretická část.....	15
2.1 Technologie vstřikování	15
2.1.2 Popis vstřikovacího cyklu	16
2.2 Vstřikovací forma	18
2.2.1 Dělení forem dle počtu desek	19
2.2.2 Násobnost forem	20
2.2.3 Vtoková soustava	21
2.2.4 Vtoky a ústí vtoků	23
2.2.6 Temperační rozvody formy	25
2.3 Aditivní technologie.....	29
2.3.1 Fotopolymerizace	30
2.3.2 Práškové spékání (Powder Bed Fusion – PBF)	32
2.3.3 Materiálová extruze	34
2.3.4 Jetting	36
2.3.5 Binder Jetting	39
2.3.6 DED (Direct Energy Deposition)	40
2.3.2 Materiály používané v aditivních technologiích	42
3. Experimentální část.....	47
3.1 Konstrukce rámové formy	47
3.2 Volba materiálů dílu a vložky	48
3.2.1 Volba materiálu dílu.....	48
3.2.2 Výběr materiálu plastové vložky formy	48
3.3 Návrh vstřikovaného dílu	50
3.4 Konstrukční návrh vložky formy	52
3.4.1 Výpočet rozměru dutiny vložky formy	52
3.4.2 Konstrukce plastové vložky formy.....	52
3.5 Zařízení použité pro tisk.....	59

3.6 Výroba vložky formy a nastavení parametrů pro tisk materiálu	61
3.7 Tisk a příprava vložky formy na vstřikování (první zkoušení)	64
3.8 Vstřikování dílů do vložky formy (první zkoušení)	68
3.9 Měření termokamerou (první zkoušení)	74
3.10 Naměřené hodnoty rozměrů dílu (první zkoušení).....	75
3.11 Konstrukční úpravy, tisk a příprava vložky formy (druhé zkoušení)	76
3.12. Vstřikování dílu do vložky formy (druhé zkoušení)	80
3.13 Měření termokamerou (druhé zkoušení)	83
3.14 Naměřené hodnoty dílu (druhé zkoušení)	84
4. Shrnutí výsledků měření.....	85
5. Závěr práce	87
6. Literatura.....	88

Seznam použitých zkratk a symbolů

3D		Trojdimenzionální
A		Bod začátku vstřikování taveniny
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren
AMPCO		Vysoce tepelně vodivá slitina mědi
AMPCOLOY		Vysoce tepelně vodivá slitina mědi
APF		Arburg Plastic Freeforming
ASA		Akrylonitrilstyrenakrylát
B		Bod začátku dotlaku
BJ		Binder Jetting
C		Bod zatuhnutí vtoku
CAD		Computer-Aided Design
CDLP		Continual Digital Light Processing
CO ₂		Oxid uhličitý
CV	[%]	Chyba měření
D		Bod začátku plastikace
DLP		Digital Light Processing
DOD		Drop-On-Demand
DMLS		Direct Metal Laser Sintering
E		Bod konce plastikace
EBAM		Electron Beam Additive Manufacture
EBM		Electron Beam Melting
F		Bod začátku otvírání formy
FDM		Fused Deposition Modelling
HIPS		Houževnatý polystyrén
K _d	[%]	objemové smrštění taveniny plastu při chladnutí
PA		Polyamid (Nylon)
PBF		Powder Bed Fusion
PC		Polykarbonát
PEEK		Polyetereterketon
PEI		Polyeterimid
PET		Polyetylentereftalát

PETG		Polyetylenteraftalátglykol
PLA		Kyselina polymléčná
PVA		Polyvinylalkohol
s_p	[-]	Hodnota smrštění dílů po vstřikování
s	[-]	směrodatná odchylka
SLA		Stereolitografie
SLM		Selective Laser Melting
SLS		Selective Laser Sintering
MFJ		Multi Jet Fusion
MJ		Material Jetting
NPJ		Nano particle jetting
LENS		Laser Engineered Net Shape
p_i	[MPa]	Tlak v dutině formy
t	[s]	Čas vstřikovacího cyklu
t_{s1}	[s]	Čas zavírání formy
t_{s2}	[s]	Čas přisunutí vstřikovací jednotky
t_v	[s]	Čas vstřikování
t_D	[s]	Čas dotlaku
t_{pl}	[s]	Čas plastikace
t_{chl}	[s]	Čas chlazení
t_m	[s]	Čas otevřené formy – vyjmutí dílu
t_{s3}	[s]	Čas otvírání formy
ε	[-]	Emisivita
\bar{x}	[-]	Aritmetický průměr

Seznam obrázků

Obr. 1 Nárazník automobilu (vlevo) [6], běžné plastové díly v domácnosti (vpravo) [7]	15
Obr. 2 Graf vstřikovacího cyklu [3].....	16
Obr. 3 Uzavřená dvou desková vstřikovací forma s popisem [2].....	18
Obr. 4 Jednoduchá dvoudesková forma [9].....	19
Obr. 5 Vícepatrová forma na výrobu ramínek (vlevo) [10] a třídesková forma (vpravo) [11].....	19
Obr. 6 Rámová forma s vložkou [12].....	20
Obr. 7 Jednonásobná forma na výrobu lopatky ventilátoru [13].....	20
Obr. 8 Vícenásobná vstřikovací forma [14].....	21
Obr. 9 „Family forma“ na výrobu krabičky s víkem [15].....	21
Obr. 10 Přehled konstrukce vstřikovací formy dle typu vtokové soustavy [17].....	21
Obr. 11 Porovnání provedení rozváděcích kanálů [2].....	22
Obr. 12 Sestava horkého rozvodu s vyhříváním rozvodem a uzavíratelným vtokem [18].....	23
Obr. 13 Plný kuželový vtok [8].....	23
Obr. 14 Bodový vtok [8].....	23
Obr. 15 Filmový vtok [8]	24
Obr. 16 Tunelový vtok [8].....	24
Obr. 17 Banánový vtok [8].....	25
Obr. 18 Talířový vtok [8].....	25
Obr. 19 Klasické provedení temperačního rozvodu [19].....	26
Obr. 20 Temperační kanál s přepážkou [20].....	26
Obr. 21 Temperační kanál s fontánkovou trubicí [20].....	27
Obr. 22 Temperační kanál se spirálovou přepážkou pro úzké dutiny (vlevo a uprostřed), temperační kanál se spirálovou přepážkou pro široké dutiny (vpravo) [20]	27
Obr. 23 Princip tepelné trubice (vlevo), temperační kanál s tepelnou trubicí (vpravo) [20].....	28
Obr. 24 Porovnání konvenčního temperačního systému s řešením Contura [22].....	29
Obr. 25 Popis SLA tiskárny [23].....	31
Obr. 26 Popis DPL tiskárny [25].....	31
Obr. 27 Porovnání SLA a DLP [23]	32
Obr. 28 Popis SLS tiskárny [25].....	33
Obr. 29 Popis FDM tiskárny [25].....	36

Obr. 30 Rozměry extruzní trysky pro FDM tiskárnu [26].....	36
Obr. 31 Popis polyjet tiskárny [25].....	37
Obr. 32 Princip freeformer tiskárny [28].....	39
Obr. 33 Popis BJ tiskárny [25].....	40
Obr. 34 Popis EBAM tiskárny [29].....	41
Obr. 35 Popis LENS tiskárny [30].....	42
Obr. 36 Přehled nejpoužívanějších aditivních technologií [37].....	43
Obr. 37 Složení rámové formy použité pro vstřikování	47
Obr. 38 Detail pozice vtoku, temperačních kanálů a přípevňovacích šroubů M6	48
Obr. 39 Vytištěný díl z Proto-pasta Cooper Fill HTPLA po tisku a následném vyleštění	50
Obr. 40 Návrh modelu automobilu.....	51
Obr. 41 Rozměry dílu.....	51
Obr. 42 Prostor pro umístění dílu.....	53
Obr. 43 Umístění dutiny dílu do vložky formy	53
Obr. 44 Vzhled dutiny dílu ve formě a montážních otvorů.....	54
Obr. 45 Vtokový kanál s posunem dělicí roviny pro správné vedení vtokového kanálu.....	54
Obr. 46 Ústí vtoku	55
Obr. 47 Ukázka možnosti rozměrů pro vedení temperačních kanálů.....	55
Obr. 48 Geometrie parametrů tab. 16. [16].....	56
Obr. 49 Rozmístění chladících kanálů tvárníku.....	56
Obr. 50 Konstrukční návrh tvárníku s temperačním rozvodem.....	57
Obr. 51 Rozmístění chladících kanálů tvárnice v rovině XY.....	57
Obr. 52 Rozmístění chladících kanálů tvárnice v rovině YZ.....	58
Obr. 53 Konstrukční návrh tvárnice s temperačním rozvodem.....	58
Obr. 54 Celkový konstrukční návrh vložky formy	59
Obr. 55 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 [35].....	60
Obr. 56 Zkušební etalon se základními rozměry a popisem	61
Obr. 57. Delaminace vrstev na etalonu.....	62
Obr. 58 Vzhled vytištěného etalonu po tisku.....	62
Obr. 59 Posuvné měřidlo Mitutoyo digimatic 500-120.....	63
Obr. 60 Průběh tisku tvárnice vložky formy.....	64
Obr. 61 Vzhled tvárníku vložky formy po tisku.....	65
Obr. 62 Vzhled tvárnice vložky formy po tisku.....	66
Obr. 63 Detail kvality dutiny vložky formy.....	67

Obr. 64 Složená vložka formy po opravě tmelem a zbrúšení	68
Obr. 65 Složená vložka formy po opravě tmelem a zbrúšení	68
Obr. 66 Prosakující vody skrz tvárník vložky formy	69
Obr. 67 Prasklina na tvárníku vložky	69
Obr. 68 Vstřikovací jednotka Engel Victory 1800/300 tech.....	70
Obr. 69 Vzhled tvárníku a tvárnice vložky formy po vstřikování	71
Obr. 70 Vzhled tvárníku a tvárnice vložky formy po vstřikování	72
Obr. 71 Díl č. 1 bez použití separátoru	73
Obr. 72 Díl č. 5 bez použití separátoru	73
Obr. 73 Díl č. 25 s použitím separátoru	73
Obr. 74 Díl s přetokem	73
Obr. 75 Termokamera FLIR i5	74
Obr. 76 Teplota tvárnice a tvárníku	74
Obr. 77 Teplota vstřikovaného dílu po vyjmutí z formy.....	75
Obr. 78 Měřené rozměry vstřikovaného dílu	75
Obr. 79 Změny rozměru vstřikovaného dílu oproti nominálním hodnotám (první zkoušení)	76
Obr. 80 Skica rozvržení temperačních kanálů tvárníku s 5 mm kanály.....	77
Obr. 81 Vzhled temperačního rozvodu tvárníku s 5 mm kanály	77
Obr. 82 Konstrukční úprava ústí vtoku.....	78
Obr. 83 Bosch Dremel 4000	78
Obr. 84 Fréza použitá pro zbrúšení povrchu formy	79
Obr. 85 Vzhled dutiny vložky formy po opracování (druhé zkoušení).....	79
Obr. 86 Vztlínání vody skrz tvar vložky formy tvárníku (druhé zkoušení)	80
Obr. 87 Vzhled tvárníku vložky formy po vstřikování (druhé zkoušení).....	81
Obr. 88 Vzhled tvárnice vložky formy po vstřikování (druhé zkoušení)	82
Obr. 89 Probořená stěna vložky formy tvárnice (druhé zkoušení)	82
Obr. 90 Vstřikovaný díl č.7 (druhé zkoušení).....	83
Obr. 91 Díl s přetokem (druhé zkoušení)	83
Obr. 92 Teplota tvárnice a tvárníku (druhé zkoušení)	83
Obr. 93 Teplota vstřikovaného dílu po vyjmutí z formy (druhé zkoušení)	84
Obr. 94 Změny rozměru vstřikovaného dílu oproti nominálním hodnotám (druhé zkoušení)	84

Seznam tabulek

Tab. 1 Klady a zápory fotopolymerizačních technologií [23]	30
Tab. 2 Parametry fotopolymerizační technologie [23,24]	30
Tab. 3 Klady a zápory práškového spékání [25]	32
Tab. 4 Parametry práškového spékání [24,25]	33
Tab. 5 Klady a zápory materiálové extruze [24,25]	35
Tab. 6 Parametry materiálové extruze [24,25,26]	35
Tab. 7 Klady a zápory jetting [25]	36
Tab. 8 Parametry jetting [25]	37
Tab. 9 Klady a zápory binder jetting [25]	39
Tab. 10 Parametry binder jetting [25]	40
Tab. 11 Klady a zápory direct energy deposition [25, 29]	41
Tab. 12 Parametry direct energy deposition [25, 29]	41
Tab. 13 Materiály využívané aditivními technologiemi [31,32,33,34,35,36]	43
Tab. 14 Vlastnosti materiálu Proto-pasta Cooper Fill HTPLA [39]	50
Tab. 15 Zvolené hodnoty [16]	56
Tab. 16 Parametry tiskárny Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 [35]	60
Tab. 17 Parametry tisku dle výrobce materiálu	61
Tab. 18 Výsledky naměřených hodnot smrštění etalonů	63
Tab. 19 Parametry vstřikovacího zařízení	70
Tab. 20 Parametry nastavení vstřikování	71
Tab. 21 Výsledky naměřených hodnot smrštění po 24 h (první zkoušení)	76
Tab. 22 Parametry nastavení vstřikování (druhé zkoušení)	80
Tab. 23 Výsledky naměřených hodnot smrštění po 24 h (druhé zkoušení)	84

1. Úvod

V poslední době lze pozorovat velké rozšíření aditivních technologií jak v průmyslu, tak i pro laickou veřejnost. Díky tomuto masovému rozšíření vzniklo mnoho firem, zabývajících se tvorbou ekonomicky nenáročných 3D tiskových zařízení, především typu FDM a vývojem tiskové struny. Výrazné rozšíření aditivních technologií (3D tisk) dále otevírá nové možnosti ve výzkumu, jehož výsledky mohou být pro průmyslovou sféru ekonomicky zajímavé, především v oblasti tvorby prototypových dílů.

Ze současných poznatků, uveřejněných různými institucemi lze usoudit, že za pomoci 3D tisku metodou SLA s využitím materiálu na bázi ABS je možné vyrobit jednoduché vstřikovací formy neobsahující temperační kanály. Životnost takto vyrobené formy je pouze v rámci několika desítek vstřiků. [1]

Tyto poznatky přivedly společnost Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o. k myšlence vytvořit vložku vstřikovací formy technologií FDM s plánovanou životností 100 vstřikovaných dílů. Hlavní odlišností od běžně vyráběných forem za pomoci 3D tisku je zapracování temperačního okruhu do formy. Ten by měl výrazně zvýšit životnost vložky formy a umožnit tvorbu dílů o větší tloušťce stěny. Polymery jsou špatným tepelným vodičem, a pokud jsou z nich vyrobeny formy, neodvádí dostatečně teplo z taveniny. Díky postupu vývoje u materiálům aditivní technologie, lze dnes nalézt tiskové struny v podobě kompozitu, skládajícího se z kombinace termoplastické matrice a kovových prášků, kdy výsledný produkt vykazuje schopnost dobře vést teplo. Z tohoto důvodu byla zadána tato diplomová práce, která se zabývá aplikací vodivých polymerních materiálů pro aditivní výrobu tvarových částí vstřikovacích forem. Výsledky této práce by mohly usnadnit a výrazně zlevnit výrobu prototypových forem.

2. Teoretická část

Hlavním cílem diplomové práce je konstrukční návrh a tvorba vstřikovací vložky formy vyrobená aditivní technologií. Teoretická část se proto zabývá technologií vstřikování, zásadami konstrukce vstřikovací formy, typy aditivních technologií a materiály používané pro aditivní technologie.

2.1 Technologie vstřikování

Vstřikování je nejrozšířenější technologie zpracování plastů vycházející z vysokotlakého vstřikování kovů s možností tvorby dílů o hmotnosti necelého gramu až po několik kilogramů. Princip výroby touto technologií spočívá ve vstřikování roztaveného plastu pod vysokým tlakem do uzavřené dutiny formy. Ta je danou taveninou kompletně vyplněna. Po ztuhnutí taveniny se forma otevře a vyjme se z ní hotový výstřik. Výrobek vyrobený tímto procesem se nazývá vstřikovaný díl. [2,3]

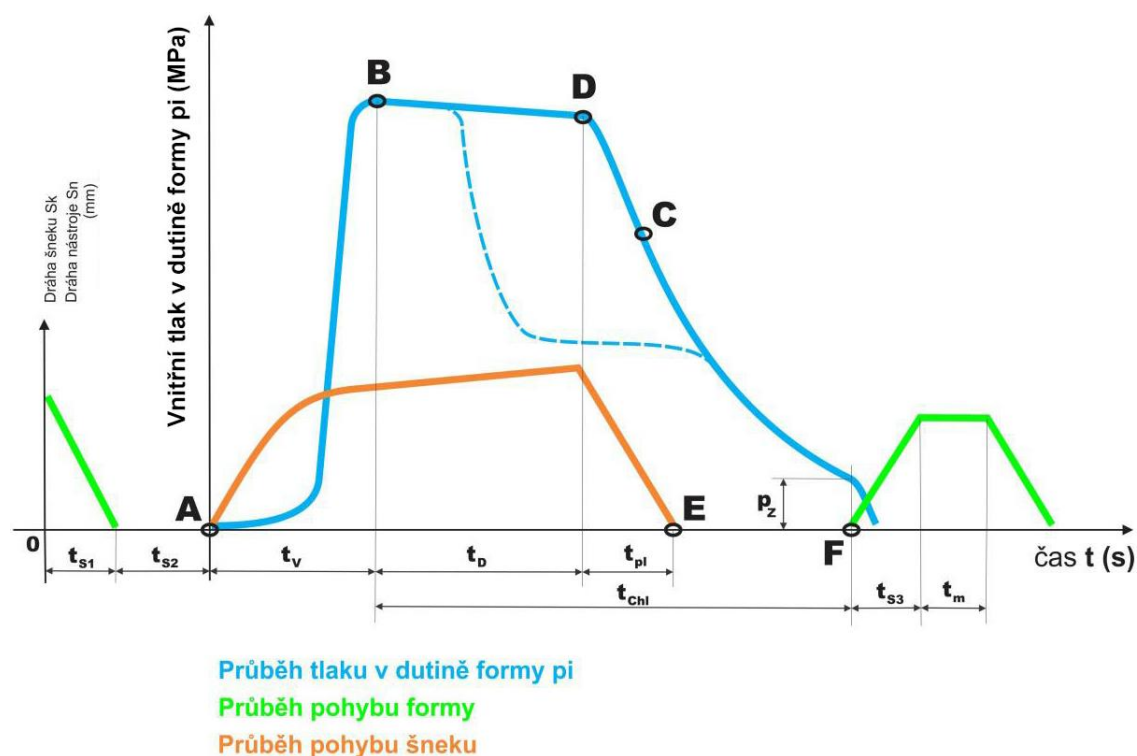
Proces vstřikování je výhodný i přes vysokou cenu výrobního zařízení a formy. Rychle se opakující cyklus stroje umožňuje vyrábět velké množství dílů za krátký časový úsek. Další z výhod výroby této technologie je možnost tvorby tvarově velmi složitých dílů o vysoké rozměrové přesnosti, které jiné metody pro zpracování plastů nejsou schopny dosáhnout. Takto vyrobené díly lze nalézt prakticky kdekoli okolo nás. Nejčastější použití je v automobilovém průmyslu (obr. 1 vlevo), spotřebním průmyslu a v domácnostech (obr. 1 vpravo). [2,4,5]



Obr. 1 Nárazník automobilu (vlevo) [6], běžné plastové díly v domácnosti (vpravo) [7]

2.1.2 Popis vstřikovacího cyklu

Nejjednodušší způsob popisu vstřikovacího cyklu je pomocí $p_i - t$ diagramu (obr. 2), kde lze popsat průběh tlaků v dutině formy (modrá barva), dráhu šneku vstřikovacího stroje (oranžová barva) a formy (zelená barva) v průběhu výrobního cyklu v závislosti na čase. [3]



Obr. 2 Graf vstřikovacího cyklu [3]

- Fáze zavírání

Samotný vstřikovací cyklus začíná zavíráním otevřené formy za časový úsek t_{s1} . Ta je držena u sebe uzavírací silou, která zabraňuje jejímu otevření při vstřikování. Po jejím uzavření se v čase t_{s2} přisouvá vstřikovací jednotka k formě. Tyto dva časy označujeme za strojní časy. [3,4,5]

- Fáze vstřikování

V místě A začíná šnek vstřikovat taveninu z tavící komory přes trysku do dutiny formy. Zde prudce narůstá tlak, kdy za dobu t_v je naplněno mezi 95 % až 97 % objemu dutiny. Na konci tohoto časového úseku v místě B působí v dutině formy nejvyšší tlak. [3,4,5]

- Fáze dotlaku

Plast při ochlazování zmenšuje svůj objem, proto je od bodu B nutné provádět dotlak po dobu t_D . Ten je tvořen pomalým posunem šneku vpřed tlačící zbývajícím objem taveniny do dutiny formy. Fáze dotlaku je ukončena v bodě D. Bod C ukazuje čas, kdy zatuhne vtok a již není možné provádět dotlak. Přerušovaná čára znázorňuje průběh tlaku, kdy je prováděn řízený dotlak (ten snižuje riziko pootevření formy) [3,4,5]

- Fáze šnekování/plastikace

Mezi body D a E (časový úsek t_{pl}) dochází k zapnutí rotace šneku při současném zpětném chodu. Při tomto procesu je do násypky nasypána dávka granulátu, která je díky rotaci šneku dopravována před jeho čelo a zároveň je za pomoci tření o stěny šneku a ohřevu v tavící komoře zplastikován – vzniká tavenina. [3,4,5]

- Fáze chlazení

Fáze chlazení je mezi body B a F (časový úsek t_{chl}) a udává dobu nutnou pro kompletní ztuhnutí taveniny ve formě, aby mohl být daný výrobek vyjmut z formy. [3,4,5]

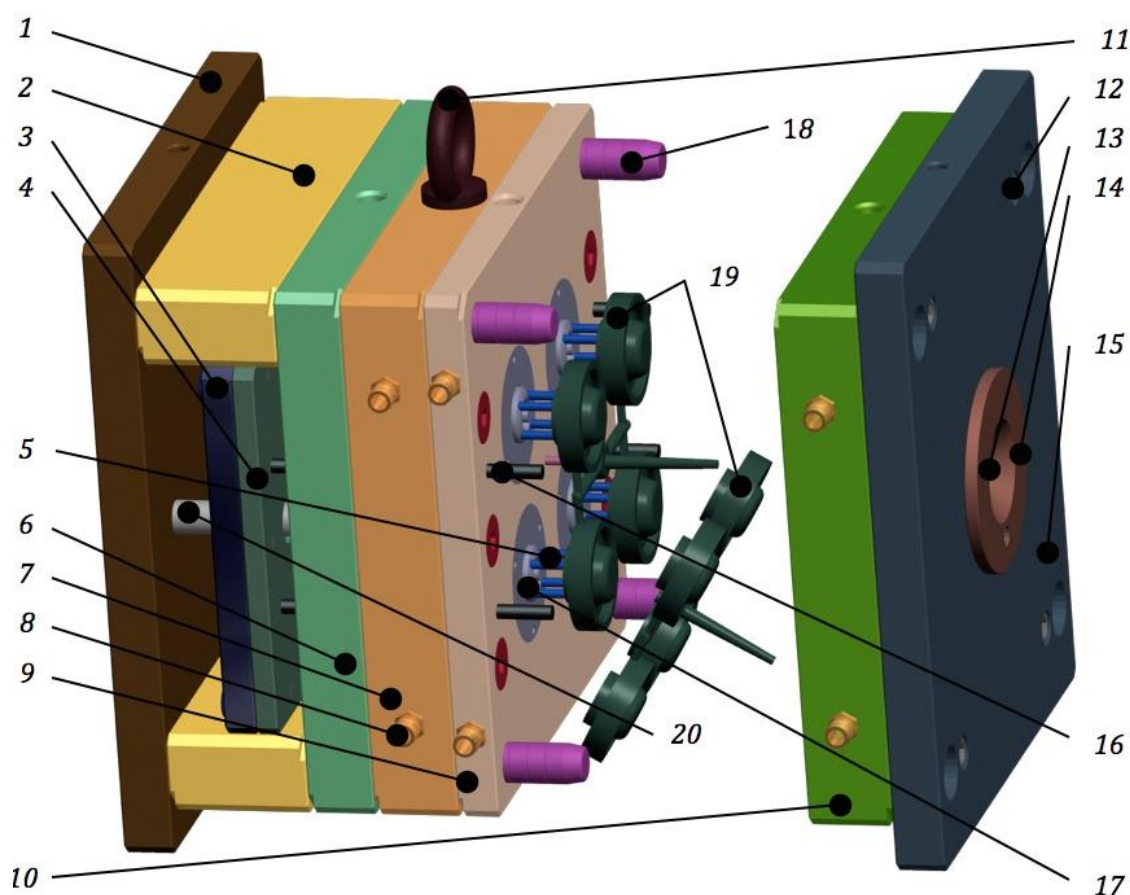
- Fáze Otevírání formy

Poslední fáze je mezi body F a A, zahrnuje otevření formy za časový úsek t_{s3} a dále časový úsek t_m pokrývající manipulační dobu pro vyjmutí dílu z formy a případné vložení zastříkovaných částí do dutiny formy. Po této fázi se zavírá forma a začíná opakování celého vstřikovacího cyklu od bodu A. [3,4,5]

2.2 Vstřikovací forma

Z důvodu zaměření diplomové práce na tvorbu vložky vstřikovací formy za pomoci aditivních technologií, se budu věnovat pouze oblastem, které s danou problematikou souvisí.

Forma je nástroj obsahující dutinu, která je negativem vstřikovaného dílu. Pro velkoobjemovou výrobu s krátkým výrobním cyklem je samotná dutina formy nedostačující, proto vstřikovací forma obsahuje další součásti, které umožňují splnit dané požadavky. Podrobný popis formy a její složení je možné vidět na obr. 3. [2]



Obr. 3 Uzavřená dvou desková vstřikovací forma s popisem [2]

1 upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2 rozpěra, 3 hlavní vyhazovací deska, 4 přidržovací vyhazovací deska, 5 vyhazovač, 6 podpěrná deska, 7 „B“ deska, 8 přípojka chlazení, 9 „C“ deska, 10 „A“ deska, 11 manipulační oko, 12 hlavní montážní šrouby, 13 vtoková vložka, 14 středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15 upínací deska pevné části vstřikovací formy, 16 vracecí kolíky, 17 pevné jádro, 18 vodící sloupky, 19 vstřikovaný díl, 20 podpěrné válce

2.2.1 Dělení forem dle počtu desek

Vstřikovaný díl je nutné z dutiny vyjmout, proto má každá vstřikovací forma minimálně jednu dělicí rovinu, která rozděljuje formu minimálně na dvě části. Počet desek formy výrazně ovlivňuje složitost formy a jejího dílu. [2, 8]

Dvoudeskové formy

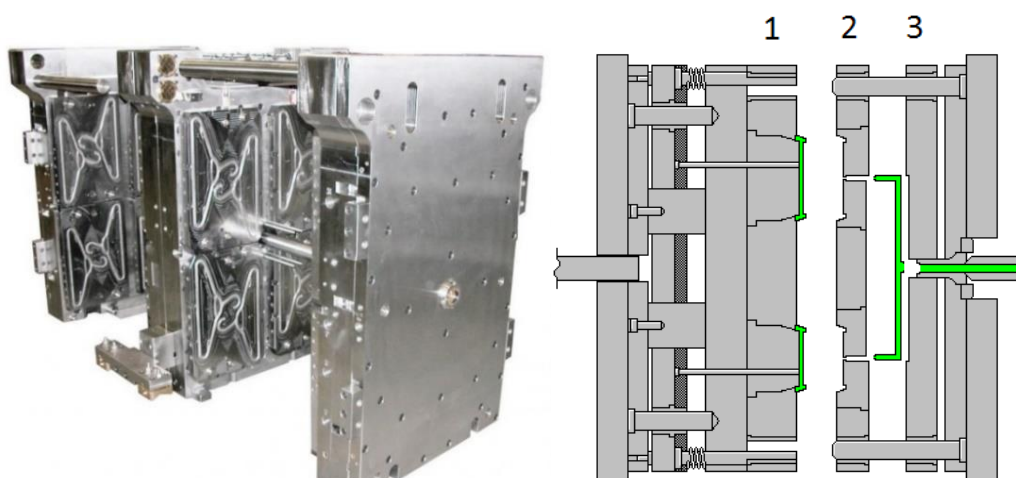
Dvoudesková forma je nejpoužívanější typ vstřikovací formy. Ta obsahuje pouze jednu dělicí rovinu (obr. 4). [2, 8]



Obr. 4 Jednoduchá dvoudesková forma [9]

Tři a více deskové formy

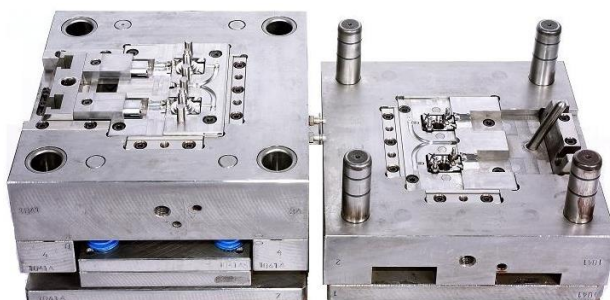
Tři a více deskové formy obsahují vždy více než jednu dělicí rovinu. Větší počet desek umožňuje tvorbu více patrové formy (obr. 5 vlevo), která je schopna vyrábět velké množství dílů najednou. Dále je možné vést studenou vtokovou soustavu na jiné desce, než má dutina formy. To umožňuje oddělení vtoku od dílu již při samotném otvírání formy (obr. 5 vpravo). [8]



Obr. 5 Vícepatrová forma na výrobu ramínek (vlevo) [10] a třídesková forma (vpravo) [11]

Rámové formy s vložkou

Rámová forma s vložkou je velmi často využívána pro dvoudeskové řešení formy. Hlavní rozdílem od klasického řešení je existence definovaného otvoru namísto dutiny formy. Ten obsahuje přívod pro napojení vtoků a temperačních kanálů. Do tohoto prostoru je možné namontovat výměnou vložku s různými typy dutin formy (obr. 6.). To činí rámovou formu s vložkou velmi univerzální. Při změně vstřikovaného dílu pak není nutné měnit celou formu. Tento typ formy je velmi často používán pro výrobu drobnějších prototypových dílů nebo zkušebních tělísek. [8]



Obr. 6 Rámová forma s vložkou [12]

2.2.2 Násobnost forem

Násobnost formy určuje, kolik dílů bude vyrobeno při jednom pracovním cyklu. Z ekonomického hlediska je snaha vytvořit tolik dutin formy, aby byla co nejvíce využita plastikační kapacita stroje. Obecné rozdělení je následující:

Jednonásobné formy

Jednonásobná forma obsahuje dutinu pro tvorbu jednoho dílu. Důvodem pro toto řešení je výroba velmi rozměrných dílů, nebo dílů s velmi komplikovaným tvarem (obr. 7). [2, 8]



Obr. 7 Jednonásobná forma na výrobu lopatky ventilátoru [13]

Dvou a vícenásobné formy

Dvou a vícenásobné formy mají více než jednu dutinu formy (obr. 8.), což výrazně snižuje cenu dílu a zvyšuje objem výroby na jednom stroji. Díky tomu je tento typ formy velmi žádaný. [8]



Obr. 8 Vícenásobná vstříkovací forma [14]

„Family formy“

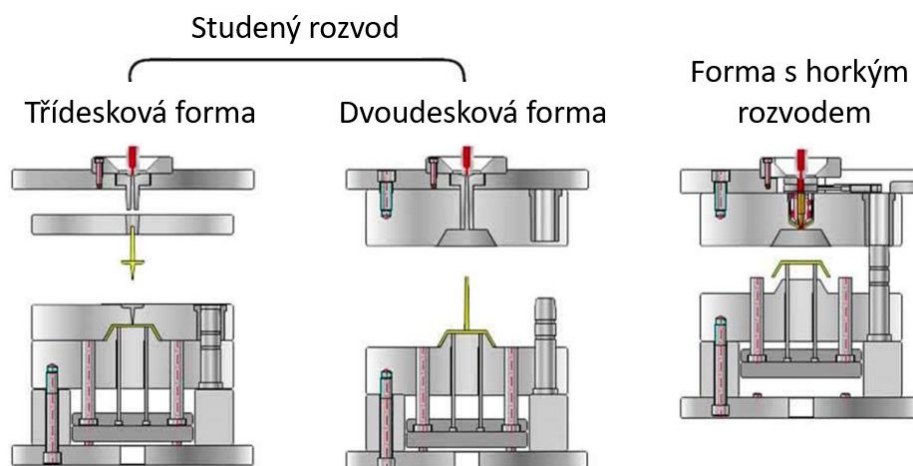
„Family formy“ jsou speciální typy forem obsahující více dutin různých dílů. Tyto díly jsou velmi často součástí jednoho výrobku (obr. 7). [8]



Obr. 9 „Family forma“ na výrobu krabičky s víkem [15]

2.2.3 Vtoková soustava

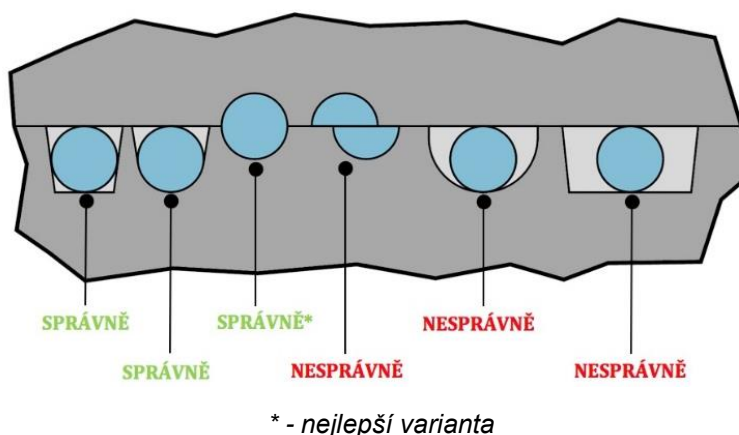
Vtoková soustava slouží pro rozvod taveniny plastu od vstříkovací jednotky do dutiny formy. Základní typy vtokových rozvodů dělíme na studené rozvody a horké rozvody (obr. 10). [8,16]



Obr. 10 Přehled konstrukce vstříkovací formy dle typu vtokové soustavy [17]

Studené rozvody

Studený rozvod je provedení, kdy je tavenina vedena z trysky vstřikovací jednotky přes rozváděcí kanál do dutiny formy. To znamená, že tavenina začíná chladnout v kanálu během fáze plnění. Tyto kanály, jsou především umístěny v dělicí rovině, kdy pro jejich tvar platí určitá pravidla (obr. 11). Velikost rozváděcího kanálu závisí na velikosti dutiny formy a objemu výrobku. Příliš velký průměr kanálu sice dobře a rychle naplní dutinu formy, ale zároveň spotřebovává velké množství materiálu ve vtokové soustavě, která je následně považována za odpadní materiál, což není ekonomicky výhodné. Na druhou stranu příliš malý plnicí kanál může způsobovat potíže s plněním nebo dokonce předčasným zatuhnutím taveniny před tím, než se dostane do dutiny formy. Proto je důležité nalézt správný kompromis ve velikosti průřezu. [2, 16]



Obr. 11 Porovnání provedení rozváděcích kanálů [2]

Horké rozvody

Hlavní rozdílem horkého rozvodu je, že oproti studenému rozvodu jsou jeho vtokové kanály vyhřívány na teplotu taveniny (obr. 12). Tím odpadá nutnost spolu s vyrobeným dílem vyjímát z formy i vtokovou soustavu. [2, 16]

Další podstatnou výhodou tohoto řešení je možnost vstřikování velkých dílů s mnoha vtoky, které mohou nezávisle na sobě postupně s časem otevírat a zavírat vtokové trysky. Nevýhodou horkých rozvodů je jejich vysoká pořizovací cena a složitější výměna na jiný typ vstřikovaného materiálu, protože vtoková soustava v sobě udržuje předešlý materiál. Pro funkčnost horkých rozvodů je nutné mít na každém konci kanálu, ústícího do dutiny formy, uzavíratelnou trysku. [2, 16]



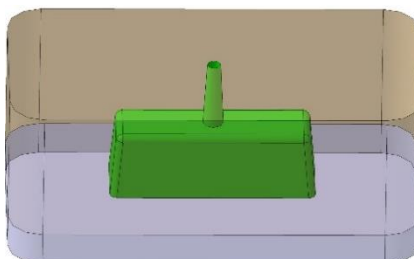
Obr. 12 Sestava horkého rozvodu s vyhřívaným rozvodem a uzavíratelným vtokem [18]

2.2.4 Vtoky a ústí vtoků

Vtoky slouží pro přivedení taveniny do dutiny formy z rozvaděčích kanálů. Protože ale mají mnohé díly různé požadavky na kvalitu pohledových ploch, není možné u většiny případů použít přímý vtok s plněním od středu dílu. Pro vyřešení tohoto problému existují různé druhy ústí vtoků. [2, 8, 16]

Plný kuželový vtok

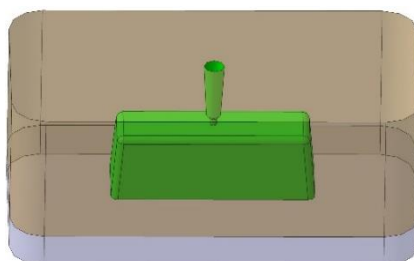
Plný kuželový vtok je nejjednodušší typ vtoku kuželového tvaru, jenž ústí do plochy dílu. Vtok je po vyhození součástí dílu, a proto je nutné ho dodatečně odstranit např. odříznutím. Z tohoto důvodu je nevhodné umisťovat tento vtok do pohledových ploch dílu (obr. 13). [8, 16]



Obr. 13 Plný kuželový vtok [8]

Bodový vtok

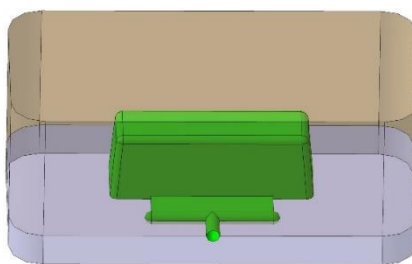
Bodový vtok je používán pro automatické oddělení vtoků od dílu při jeho vyhazování. Pozice ústí vtoku je do plochy dílu. (obr. 14). [8,16]



Obr. 14 Bodový vtok [8]

Filmový vtok

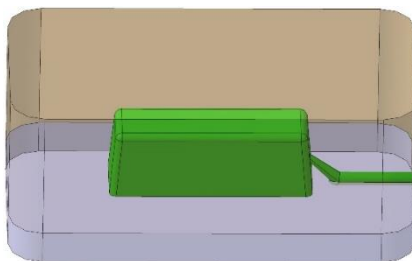
Filmový vtok je tvořen dlouhým plochým ústím vstupního kanálu vedeným přes dělicí rovinu dílu. Proto je nutné ruční oddělení vtoku od dílu. Výhodou tohoto vtoku je možnost jeho vyústění do hrany dílu (obr. 15), což je často žádané pro pohledové díly a dále pro ploché rozměrné díly, kdy díky tomuto vtoku dochází k rovnoměrnějšímu plnění. [2, 16]



Obr. 15 Filmový vtok [8]

Tunelový vtok

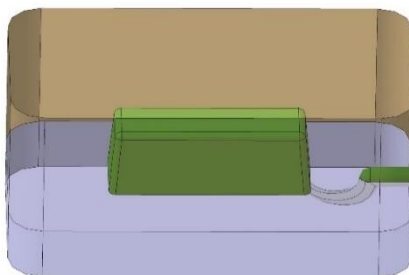
Hlavní rozvod taveniny je veden přes dělicí rovinu, kdy v určité vzdálenosti od stěny dílu vstupuje do vrtaného kanálu ve tvárnici a následně ústí do plochy dílu (obr. 16). Díky této konstrukci je oddělena vtoková soustava při vyhazování dílu za použití pouze dvoudeskové formy. [2, 16]



Obr. 16 Tunelový vtok [8]

Banánový vtok

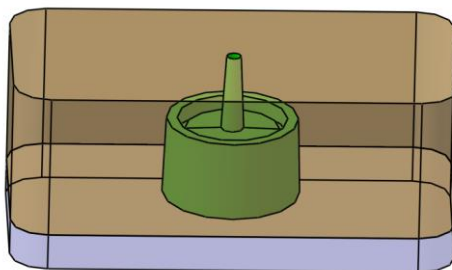
Banánový vtok vychází z vtoku tunelového s tím rozdílem, že ústí v dělicí rovině. Pro jeho funkčnost je nutné vytvořit do tvárníku formy speciálně tvarovanou dutinu, která svým tvarem připomíná banán, od něj je odvozen i jeho název (obr. 17). Podobně jako u tunelového vtoku je vtoková soustava oddělena od dílu při vyhazování. [2, 16]



Obr. 17 Banánový vtok [8]

Talířový vtok

Talířový vtok je velice podobný vtoku filmovému s tím rozdílem, že namísto rovné obdélníkové plochy pro filmový vtok je zde vytvořena kruhová plocha s hlavním vtokovým přívodem v ose dílu (obr. 18). Využití tohoto vtoku je především pro plnění součástí s velkým otvorem v ose dílu, kdy vtok zaručuje jeho rovnoměrné plnění. Stejně jako u filmového vtoku, tak i zde je po vyhození dílu nutné dodatečně odstranit vtok od součásti. [2, 16]



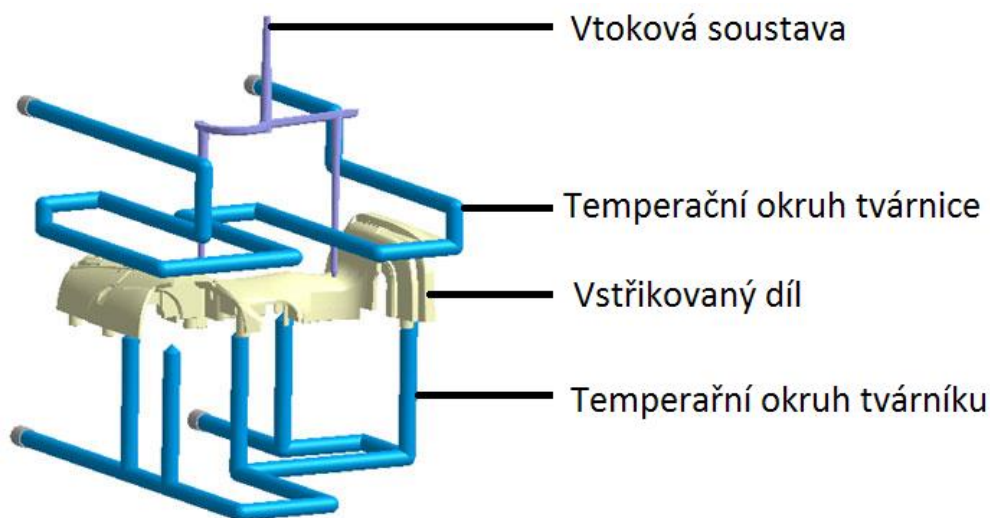
Obr. 18 Talířový vtok [8]

2.2.6 Temperační rozvody formy

Temperační rozvody plní důležitou funkci ohřevu a chlazení formy na vhodnou teplotu pro vstřikování a chlazení taveniny v dutině formy. Při výrobním procesu vstřikovaného dílu je možné nastavit jak teplotu temperační kapaliny, tak i dobu chlazení. Těmito parametry lze ovlivňovat kvalitu povrchu, morfologii, deformaci a smrštění dílu. Dalším významným parametrem ovlivněným temperačním rozvodem je výrobní čas dílu, který chceme mít co nejkratší. [2]

Samotný tvar rozvodů je u většiny forem tvořen soustavou vrtaných kanálů, jejíž následné propojení vytváří temperační okruh, jak je možné vidět na obr. 19. Při tvorbě okruhu je vždy snaha o co nejrovnoměrnější a nejbližší umístění temperačních kanálů k dutině formy. Každá forma obsahuje minimálně dva temperační okruhy. Jeden pro tvárník formy a druhý pro tvárnici. Kapalně médium

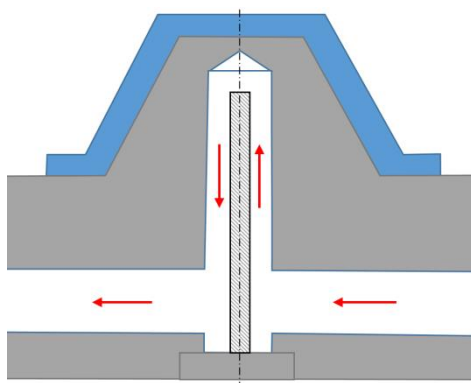
používané pro temperační rozvody je většinou voda nebo olej. Z důvodu složitosti tvaru vstřikovaných dílů, především v oblastech hlubokých otvorů a dutin, je nutné použít následující druhy vedlejších vrtaných temperačních kanálů: [2, 16]



Obr. 19 Klasické provedení temperačního rozvodu [19]

S přepážkou

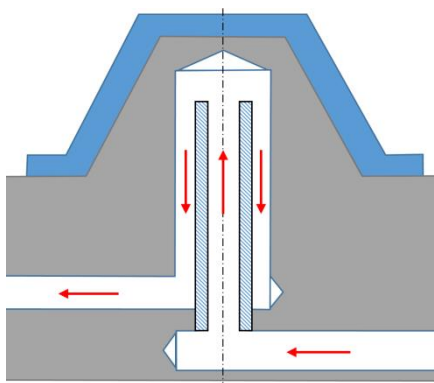
Temperační kanál s přepážkou je vhodný pro chlazení hlubších dutin. Jeho vzhled má podobu válcového kanálu, uprostřed rozděleného přepážkou, tvořící dva půlkruhové kanály. Protože je tento typ vedlejším kanálem, je nutné ho mít propojený s hlavním temperačním kanálem. Přepážka zasahuje i přes hlavní temperační kanál, čímž určuje směr toku kapaliny přes přepážku (obr. 20). Nevýhodou tohoto řešení je citlivost na přesnost umístění vložky do poloviny válce. Tato nepřesnost negativně ovlivňuje přenos tepla. [2, 8, 20]



Obr. 20 Temperační kanál s přepážkou [20]

Fontánkové trubice

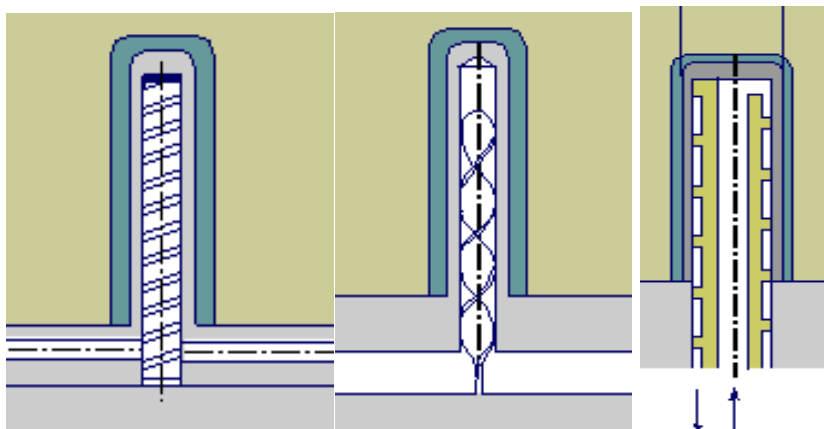
Tento druh rozvodu je také vedlejším kanálem s vnitřní přepážkou. Hlavním rozdílem je to, že se v temperačním kanálu nachází trubička namísto přepážky (obr. 21). Zde temperační médium vstupuje jedním koncem trubičky a vystupuje na druhém, kde následně rovnoměrně proudí po stěně vedlejšího kanálu. [2, 8, 20]



Obr. 21 Temperační kanál s fontánkovou trubicí [20]

Kanál se spirálovou přepážkou

Tento vedlejší temperační kanál funguje na stejném principu jako kanál s přepážkou. Hlavním rozdílem je tvar přepážky. V tomto případě se jedná o dvojitou spirálu, kdy po jedné spirále stoupá vzhůru kapalina a po druhé následně odtéká zpátky do hlavního temperačního kanálu. Na obr. 22 vlevo a uprostřed je znázorněno provedení spirál pro úzké kanály. Na obr. 22 vpravo je provedení pro kanál o průměru větším než 40 mm. Výhodou tohoto řešení oproti ploché přepážce je rovnoměrná temperace dutiny formy. Omezujícím parametrem je minimální průměr kanálu o velikosti 6 mm. [2, 20]

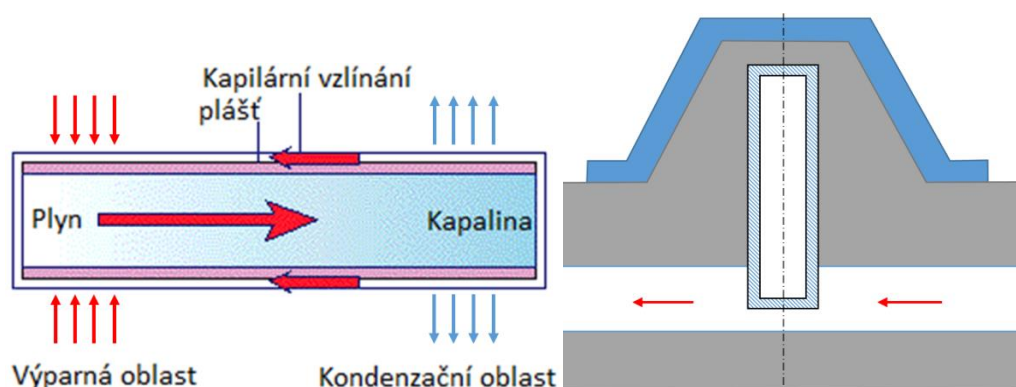


Obr. 22 Temperační kanál se spirálovou přepážkou pro úzké dutiny (vlevo a uprostřed), temperační kanál se spirálovou přepážkou pro široké dutiny (vpravo) [20]

Kromě vrtaných vedlejších temperačních kanálů existují i další možnosti temperace formy.

Tepelná trubice

Tepelná trubice je uzavřená nádoba (nejčastěji válcového tvaru) naplněná chladícím médiem. Její princip spočívá v izobarickém přenosu tepla (obr. 23 vlevo). Na ohříváném konci trubice je médium vypařováno, následně postupuje do ochlazované oblasti, ve které se přeměňuje zpět na kapalinu. Ta následně, přes laminární drážky na vnitřním povrchu nádoby, vzlíná do horké oblasti. Hlavními výhodami použití tohoto systému je rychlý přenos tepla z jednoho konce trubice na druhý a to, že trubice odvádí teplo z dané oblasti nepřetržitě, jelikož funguje na pasivním principu. Hlavní použití tepelné trubice je v dutinách dílu, kde nahrazuje přepážkový systém chlazení (obr. 23 vpravo). Nevýhodou použití tepelných trubíc je, že špatná kvalita doteku trubice se stěnou formy výrazně negativně ovlivňuje odvod tepla. [2, 8, 20]



Obr. 23 Princip tepelné trubice (vlevo), temperační kanál s tepelnou trubicí (vpravo) [20]

Temperace pomocí CO_2

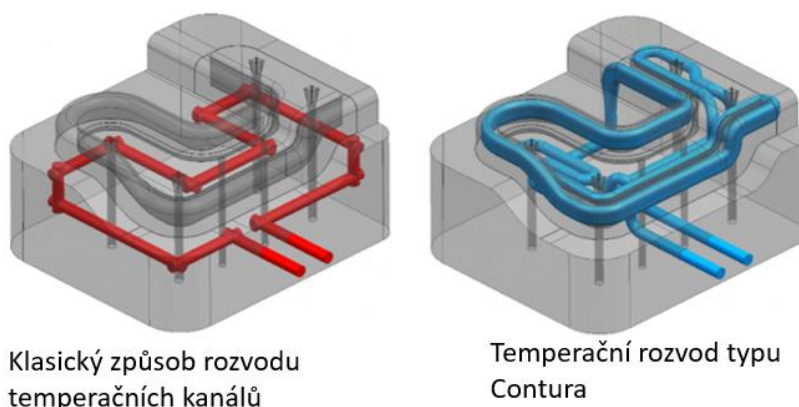
Tento systém je používán pro chlazení složitých oblastí formy. Do dutiny v problémové oblasti je vložena vložka. Vložku lze vyrobit dvěma způsoby. První je tvořen z mikroporézní oceli, kdy po přivedení CO_2 trubičkami o průměru do 2 mm plyn proniká do oceli skrz její póry a ochlazuje ji. Druhým způsobem je vložka vyrobená z obyčejné oceli, ve které jsou vytvořeny dutiny sloužící pro expanzi CO_2 , což ji následně ochlazuje. Dávkování CO_2 je prováděno v impulsech. Díky vysoké účinnosti je možné snížit dobu chlazení dílu i o několik desítek procent. [8]

Temperace pomocí vysoce tepelně vodivých materiálů

V obtížně chlazených oblastech formy lze použít vložku vyrobenou z vysoce tepelně vodivých materiálů, převážně slitin mědi typu AMPCO a AMPCOLOY, umožňují rychlejší odvod tepla z daných míst a zrovnoměnění teplotního zatížení formy. [8, 21]

Systém Contura

Systém Contura je navržen pro tvorbu kanálů kopírujících přesně tvar dílu. Vytvořit tyto kanály je možné dvěma způsoby. První je založen na rozdělení tvárníku formy do několika vrstev. Do každé vrstvy jsou následně vyfrézovány rozvody kanálů kopírující přesně tvar dutiny (obr. 24). Následně jsou tyto vrstvy spájeny pod vakuem dohromady čímž je vytvořen kompletní tvárník. Ten je následně zbroušen, aby byl povrch dutiny formy i přes spájené vrstvy rovnoměrný. Druhým způsobem tvorby je vytištění dutiny s temperačními kanály za pomoci kovového tisku metodou SLS. Hlavní výhodou systému Contura je rovnoměrné chlazení dílu v dutině. To pozitivně snižuje velikosti deformací a smrštění plastového dílu. Hlavním záporem těchto rozvodů je jejich velmi vysoká cena. [2,8]



Obr. 24 Porovnání konvenčního temperačního systému s řešením Contura [22]

2.3 Aditivní technologie

Aditivní technologie jsou technologie, které umožňují tvorbu prakticky jakéhokoli modelu vytvořeného v CAD. Samotný výrobek je vytvářen přidáváním velice tenké vrstvy materiálu na předešlou vrstvu, čímž se po mnohonásobném opakování vytvoří hotový díl. Platí to jak pro tisk jedné součástky, tak i celé sestavy součástí. To umožňuje vytvořit díly, které jiným způsobem nelze vyrobit. Nevýhodami této technologie je poměrně pomalá doba tisku a jeho vysoká cena.

Také u většiny aditivních technologií je nutné počítat s výraznou anizotropií a nižšími mechanickými vlastnostmi.

2.3.1 Fotopolymerizace

Princip je založen na tom, že fotopolymerní roztok lze vytvrdit za pomoci ozáření světlem o určité vlnové délce, která v roztoku spustí chemickou reakci. V tab. 1 jsou uvedeny hlavní klady a zápory technologie. Fotopolymerizace je především využívána pro tvorbu šperků, zubních náhrad a velmi přesných dílů s kvalitním povrchem. V následujících částech jsou popsány technologie využívající tohoto principu: [23]

Tab. 1 Klady a zápory fotopolymerizačních technologií [23]

Klady	Zápory
Vysoká rozměrová přesnost	Křehkost dílu
Nejkvalitnější tisk z aditivních technologií	Po vytištění nutné vytvrdit pod UV zářením

Tab. 2 Parametry fotopolymerizační technologie [23,24]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Foto polymerizační roztok
Tloušťka vrstvy tisku	0,05 - 0,015 mm
Maximální velikost tištěné součásti	1500x750x500 mm
Přesnost	$\pm 0,15$ % rozměru součásti
Podpůrné struktury	Ano – stejný materiál použitý pro díl

SLA (Stereolithography)

SLA vznikla v roce 1984, jedná se o nejstarší aditivní technologii. Princip výroby touto technologií je následující (obr. 25). Zařízení obsahuje nádobu s fotopolymerním roztokem, do které je ponořena tisková základna. Bodový laser na ni prosvítá skrz nádrž a postupně obkresluje požadovaný tvar. Ozářený roztok se přeměňuje do pevného skupenství, tím se vytváří vrstva polymeru. Po vytvoření vrstvy se lože posouvá o velikost nově vytvořené vrstvy vzhůru. Na tu je následně nanášena další nová vrstva. Tento proces se opakuje, dokud není vytvořena celá součást. Pro zlepšení tuhosti dílu je nutné ozářit vytištěný model pod UV světlem. Zařízení pro tisk SLA existuje ve dvou variantách. První při tisku

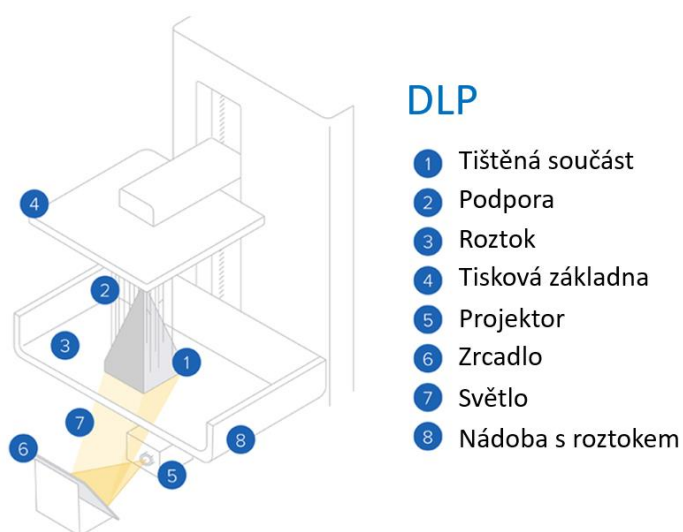
ponořuje stavební lože do roztoku. Druhá vynořuje stavební lože z roztoku díky tomu, že je zapotřebí mít ponořenou pouze tu část, na které je vytvářena nová vrstva polymeru. Výhodou druhého provedení je úspora roztoku díky použití velmi mělké vaničky na roztok. [23,24,25]



Obr. 25 Popis SLA tiskárny [23]

DLP (Digital Light Proccesing)

DLP je technologie pracující na stejném principu jako SLA. Hlavním rozdílem v zařízení je použití digitálního projektoru (obr. 26) namísto bodového laseru. Má schopnost promítnout celý obraz dané vrstvy najednou, a tím výrazně zkrátit dobu tisku. Díky promítání digitálním projektozem je promítaný obraz složen ze čtvercových pixelů. Kvalitu ohraničení dílu výrazně ovlivňuje rozlišení projektoru. Tento problém je nejvýraznější při tisku obrazů, jejichž kontura je křivka (obr. 27). [25]



Obr. 26 Popis DPL tiskárny [25]



Obr. 27 Porovnání SLA a DLP [23]

CDLP (Continual Digital Light Proccesing)

CDLP používá stejné tiskové zařízení jaké má DPL s rozdílem kontinuálního posunu stavebního lože v ose Z, při kterém promítací zařízení nepřetržitě mění tvar dle pozice výšky stavebního lože. Tato úprava vytváří tištěný díl rychleji než za použití metody DPL. [25]

2.3.2 Práškové spékání (Powder Bed Fusion – PBF)

Práškové spékání je technologie využívající tepelný zdroj ke spékání prášku pro vytvoření pevné součásti. Většina technologií tohoto typu pracuje na principu vytvoření rovnoměrné vrstvy prášku, který je následně spečen dohromady, čímž vytvoří pevnou vrstvu. Na tu je následně nanесena nová vrstva prášku, která je také spečena. Tento postup je opakován do doby, než je součást dokončena.

Využití této technologie je v případě kovových prášků pro tvorbu kovových prototypů a high-end součástí, protože je cena výroby velmi vysoká. Pro tisk termoplastových dílů je jejich využití především v oblasti výroby tvarově složitých dílů, kdy hlavní výhodou pro tisk součástí je absence podpurných struktur. [24,25]

Tab. 3 Klady a zápory práškového spékání [25]

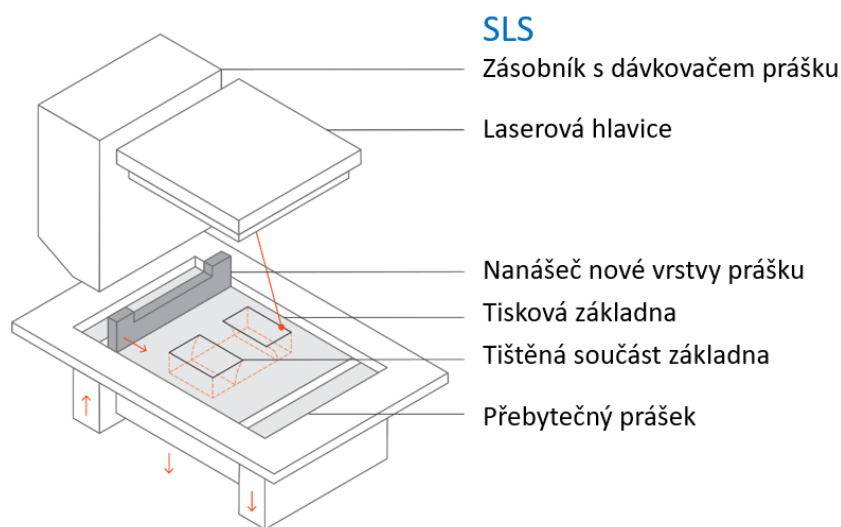
Klady	Zápory
Není zapotřebí podpor (Při tisku termoplastů)	Pórovitost materiálu
Lze vytvářet nejsložitější tvary	Hrubý povrch dílu
	Deformace dílu při tisku
	Manipulace s velmi jemným práškem

Tab. 4 Parametry práškového spékání [24,25]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Prášky (Termoplasty, kovy)
Tloušťka tisku	0,05 - 0,01 mm
Maximální velikost tištěné součásti	750x550x500 mm
Přesnost	$\pm 0,3$ % velikosti dílu
Podpůrné struktury	Kovy – ano, Termoplasty – ne

SLS (Selective Laser Sintering) - selektivní laserová sinitrace

SLS vytváří díl nanesením tenké vrstvy práškového plastu na celou plochu základny. Tenká vrstva se vytvoří pomocí laseru, kdy je spečena na ploše odpovídající průřezu dílu v daném místě (obr. 28). Základna se o tloušťku vytvořené vrstvy posune v ose Z dolů. Následně je nanесena další tenká vrstva prášku, která je znovu spečena laserem. Tato operace se opakuje, dokud není vytvořen celý díl. Po vytištění je díl vyjmut z vaničky a očištěn od nespečeného prášku. [24,25]



Obr. 28 Popis SLS tiskárny [25]

SLM a DMLS (Selective Laser Melting, Direct Metal Laser Sintering)

Tato technologie pracuje na stejném principu jako SLS s tím rozdílem, že je namísto tisku termoplastu použit kov. Pro SLM platí, že je díl vytvořen roztavením prášku za pomoci laseru, kdy je možné touto metodou vytvářet díly jak z čistého kovu (hliník) tak i ze slitin oceli. Na rozdíl od tohoto způsobu DMLS pouze zahřívá

prášek na teplotu blízko bodu tavení. Ten je chemickou vazbou spojen do sebe. Tento typ funguje pouze pro slitiny oceli. [25]

Na rozdíl od SLS u technologie SLM a DLMS vzniká při tisku velké vnitřní pnutí v součásti, které vytváří výrazné deformace. Proto potřebují při tisku podpory. Mechanické vlastnosti vytištěných dílů jsou srovnatelné s díly vytvořenými konvenčními technologiemi (kováním, tvářením plechu atd.), což umožňuje výrobu prototypových dílů odpovídajících kvalitou sériové výrobě. [25]

Výrazným negativem SLM a DMLS je manipulace s kovovým práškem před a po tisku. Drobné částice jsou po vdechnutí zdravotně závadné, proto je nezbytné nosit ochranný oblek a dýchací masku.[25]

EBM (Electron Beam Melting)

Na rozdíl od předešlých technologií, které používají pro roztavení prášku laser, technologie EBM využívá proud elektronů. Ten je schopen roztavit tenkou vrstvu prášku. Hlavní předností EBM je nižší vnitřní pnutí v součásti oproti použití laseru. Navíc je rychlejší a méně energeticky náročná. Nevýhodou je nutnost použití vodivého materiálu pro tisk a vakua v komoře a horší kvalita povrchu součástí než u SLM. [25]

MFJ (Multi Jet Fusion)

MFJ je prakticky kombinací SLS a Material Jetting. Proces výroby začíná nanesením tenké vrstvy prášku. Na něj je pomocí trysek nanesen spojující roztok po celé ploše dílu (tento princip funguje na stejném způsobu jako inkoustový tisk v tiskárně). Následně je celá plocha vytvrzena pod silným IR zářením. Poté se na tuto vrstvu nanese nová vrstva prášku a cyklus se opakuje, dokud není celá součást hotova. Po dokončení tisku je nutné vysát přebytečný prášek okolo dílu, aby bylo možné ho vyjmout. Tato technologie je zajímavá především rychlostí tisku, kdy při tisku více součástí najednou je tento způsob tisku až dvanáctkrát rychlejší než pro SLS, a dokonce až dvacet sedmkrát rychlejší než FDM. [25]

2.3.3 Materiálová extruze

Materiálová extruze patří k nejrozšířenější a k nejdostupnější aditivní technologii. Princip výroby dílu je velmi jednoduchý. Přes trysku je vytlačována housenka roztaveného materiálu. Pohybující se tryska postupně vytváří obraz tištěného

dílu. Po vytvoření jedné vrstvy se tisková hlava posouvá v ose Z a začíná tisk další vrstvy. Vše se opakuje, dokud není díl vyroben. [23,25]

Vrstvením nového materiálu na již dříve vytištěný, dochází k nedokonalému stavení vrstev. To velmi negativně ovlivňuje pevnost dílu v ose Z tisku. [25]

Samotný podavač materiálu je možné upravit pro použití multimateriálového tisku, kdy má zařízení k sobě napojeno více tiskových strun. Využívá se například pro tisk podpěr z rozpustných materiálů, dílů s více barvami nebo rozdílnými pevnostními parametry. [24,25,26]

Tab. 5 Klady a zápory materiálové extruze [24,25]

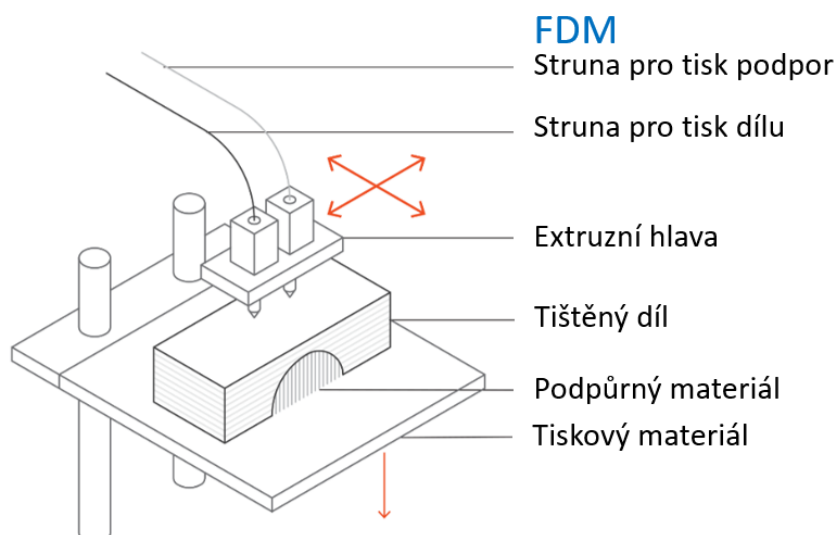
Klady	Zápory
Možnost tisku kompozitů	Vysoké anizotropické vlastnosti dílu
Schopnost tisknout velké díly	Viditelné vrstvy dílu
Nejširší škála polymerů použitelných k tisku	Nejnižší přesnost tisku z aditivních technologií
	Poměrně špatný povrch

Tab. 6 Parametry materiálové extruze [24,25,26]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Tiskové struny
Tloušťka tisku	0,5 - 0,127 mm
Maximální velikost tištěné součásti	1000x1000x1000 mm
Přesnost	$\pm 0,5\%$
Podpůrné struktury	Ano

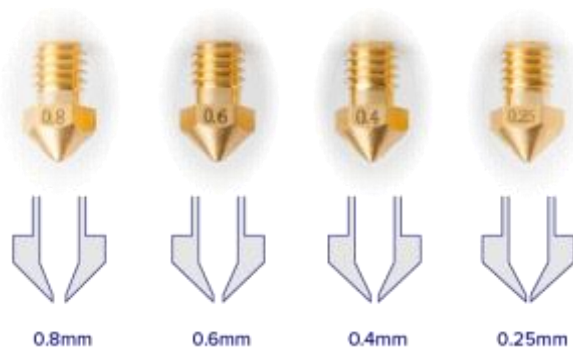
FDM (Fused Deposition Modeling)

Zařízení pro FDM (obr. 29) pracuje na principu tavení materiálu. Ten je v podobě tiskové struny přiváděn do tavicí trysky. Zde je materiál roztaven a vytlačován ven na základní lože. Díky umístění tavicí trysky na pojezdech umožňující pohyb v osách X, Y a Z je možné vést daný tavený materiál po předem definované trajektorii. [24, 25, 26]



Obr. 29 Popis FDM tiskárny [25]

Samotná přesnost tisku je udávána dle velikosti průměru extruzní trysky (obr. 30), která také udává tloušťku jedné vrstvy. Tento parametr dále ovlivňuje dobu tisku, kdy platí, že čím větší je průřez trysky, tím kratší je čas tisku. [25]



Obr. 30 Rozměry extruzní trysky pro FDM tiskárnu [26]

2.3.4 Jetting

Aditivní technologie kapičkového tisku funguje na stejném principu jako inkoustové tiskárny. Zde namísto inkoustu používáme fotopolymery, vosky nebo kovy, které je možné vytvrdit pod zvýšenou teplotou nebo UV zářením. Takto je díl tištěn a vytvrzován vrstvu po vrstvě, dokud není vytvořen kompletní díl. Díky použití kapičkového tisku je zde možnost použít více různých materiálů, jejichž využití je podobné jak u FDM. [25]

Tab. 7 Klady a zápory jetting [25]

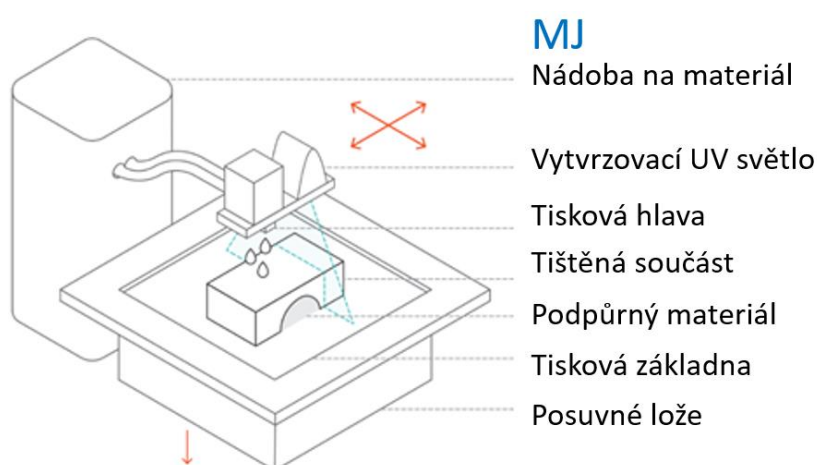
Klady	Zápory
Možnost tisku více barev na dílu	Křehký
Přesná výroba	Velmi drahý
Hladký povrch výrobku	Materiály omezeny na fotopolymery

Tab. 8 Parametry jetting [25]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Fotopolymerizační roztok/ tavenina
Tloušťka tisku	0,16 - 0,32 mm
Maximální velikost tištěné součásti	1000x800x500 mm
Přesnost	$\pm 0,1\%$
Podpůrné struktury	Vždy vyžadován – rozpustný materiál

MJ (Material Jetting - Polyjet)

Tato technologie za pomoci stovek miniaturních trysek rozprašuje fotopolymer na tiskovou základnu (obr. 31), čímž vrstvu po vrstvě vytváří díl. Každá vrstva je vytvrzována UV zářením. Díky použití velkého množství trysek je ve stejném okamžiku nanášena linka obrazu. To na rozdíl od bodového nanášení materiálu výrazně šetří čas tisku. Z důvodu nanášení fotopolymeru pouze v oblastech tisku dílu, je nutné tisknout podpory, které jsou většinou tištěny z rozpustných materiálů. [25]



Obr. 31 Popis polyjet tiskárny [25]

NPJ (Nano particle jetting)

Technologie SLS využívá pro spékání laser, který je ekonomicky i časově velmi nákladný. Z daných důvodů vznikla technologie NPJ, která vylepšuje dosavadní technologie kovového tisku. Funguje na principu použití roztoku obsahujícího kapalinu s kovovými nebo keramickými nanočásticemi. Roztok je za pomoci mnoha trysek nanášen v nano vrstvě na zahřátou tiskovou základnu s teplotou kolem 250°C. Díky vysoké teplotě základny se kapalina po dopadu roztoku okamžitě vypaří a nanočástice obalené tenkou vrstvou tavidla se spojí do

rovnoměrné vrstvy. Takto je nanášena vrstva po vrstvě, dokud není celá součást vytištěna. Poté je nutné součást na dobu 12 hodin spékat v peci, kde dochází k jejímu 17% smrštění. [25, 27]

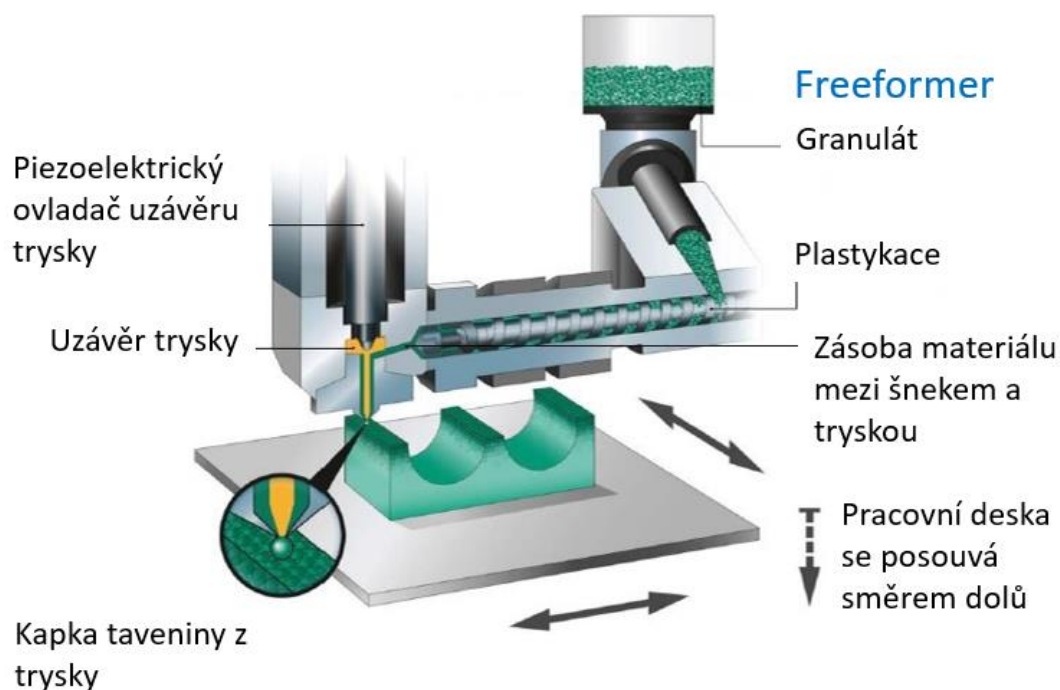
NPJ nevyžaduje podpůrné struktury, veškeré dutiny jsou vyplněny podpůrným materiálem snadno odstranitelným z dílu. Dosahuje nejpřesnějšího tisku pro kovové součásti. Hlavním záporem je rozměr tištěné součásti o velikosti do 50 mm, která je dále zmenšena spékáním. [27]

DOD (Drop-On-Demand)

DOD využívá pro tisk dílu dva materiály. Každý je nanášen ze své trysky. První stavební materiál je nejčastěji v podobě zkapalněné hmoty na bázi vosků. Druhý, vodou rozpustný, je podpůrný. Samotné nanášení materiálu na tiskovou základnu se podobá inkoustovému tisku. Při tisku vrstvy je nejprve, po předem definované křivce, vytvořen obrys obrazu, který je poté vyplněn. Aby bylo možné v další vrstvě na takto vytvořené ploše nanést novou vrstvu materiálu, jsou dutiny vyplněny podpůrným materiálem. Po vytištění každé vrstvy je nutné její seříznutí z důvodu zaručení rovinnosti plochy pro další tisk. Tímto způsobem je nanášena vrstva po vrstvě, dokud není díl dokončen. DOD je také zajímavá svým využitím, které je především v podobě vytavitelných jader forem. [25]

APF (Freeformer)

APF byla vyvinuta výrobcem vstřikovacích strojů Arburg. Ten se rozhodl zakomponovat plastikační jednotku do tiskového zařízení. Výsledné zařízení (obr. 32) obsahuje plastikační šnek, který kontinuálně plastikuje granulát na taveninu. Ta je následně vtlačena do trysky, ze které ji opouští v podobě kapiček. Ty jsou rozprašovány na plochu stavebního lože, čímž vytvářejí vrstvu tiskového dílu. Jelikož je pracovní deska posuvná v osách X, Y a Z, je plastikační jednotka s tryskou statická, což umožňuje umístění více jednotek za sebou a tím možnost multimateriálového tisku. Další významnou výhodou dané technologie je nejširší použití škály materiálů a jejich cena z důvodu použití granulátu určeného pro vstřikování. Omezením této technologie je nemožnost použití materiálů s plnivem. [28]



Obr. 32 Princip freeformer tiskárny [28]

2.3.5 Binder Jetting

Tato technologie pracuje na principu nanášení kapalného roztoku pojiva z trysky do práškové vrstvy. Nanášením roztoku při každé nové vrstvě prášku, je postupně vrstvu po vrstvě vyráběn celý díl.

Binder Jetting je nejčastěji používán pro spojování keramických a kovových prášků. Součásti tvořené z keramického prášku jsou vhodné pro vzhledovou prezentaci kvůli jeho velmi kvalitnímu povrchu. Také je využíván pro tisk pískové formy. Vytvořené součásti jsou však velmi křehké.

Kovový tisky slouží především jako levnější náhrada pro SLS. Bohužel i tyto díly trpí horšími mechanickými vlastnostmi v porovnání s dražšími aditivními technologiemi. [25]

Tab. 9 Klady a zápory binder jetting [25]

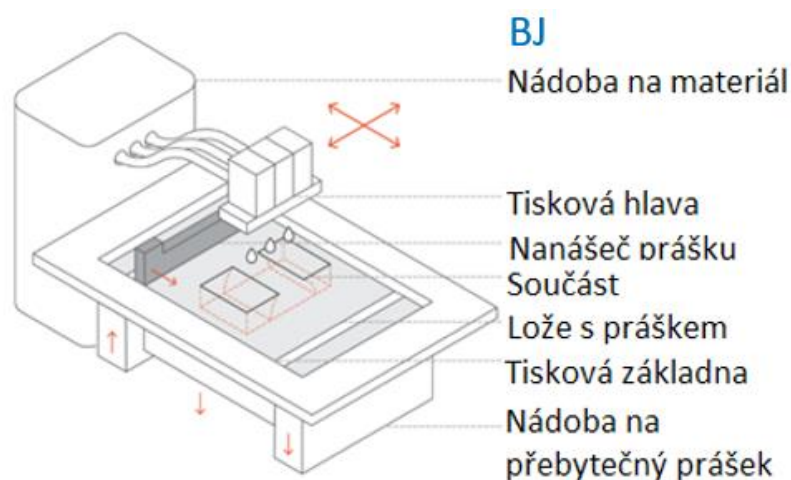
Klady	Zápory
Není potřeba podpůrného materiálu	Křehkost dílů
Ekonomicky přijatelnější než SLS	Nutnost spékání v peci
	Velmi často je zapotřebí vytvořit dodatečnou povrchovou ochranu

Tab. 10 Parametry binder jetting [25]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Keramický, kovový prášek
Tloušťka tisku	Kov 35 - 40 μm , písek 200 - 400 μm
Maximální velikost tištěné součásti	800x500x400 mm
Přesnost	Kov $\pm 0,5-2 \%$ písek $\pm 0,2 \text{ mm}$
Podpůrné struktury	Ne

BJ (Binder Jetting)

BJ nanáší kapalný roztok pojiva do vrstvy prášku (obr. 33). Podobně jako je tomu u inkoustového tisku, je rozstříkván z trysky pohyblivé hlavičky. Po kontaktu pojiva s práškem dochází k tvorbě ucelené vrstvy, z té je následně vypařena voda z naneseného pojiva. Stavební lože se posouvá v ose Z dolů a je nanesena nová vrstva prášku. Proces se opakuje vrstvením, dokud není celá součást dokončena. Následně je vyjmuta z lože plného prášku a spečena v peci. [25]



Obr. 33 Popis BJ tiskárny [25]

2.3.6 DED (Direct Energy Deposition)

Tvorba součásti touto technologií probíhá nanášením roztaveného materiálu na stavební základnu. Tavení materiálu vzniká v tiskové trysce, kde je materiál nejčastěji v podobě prášku nebo tiskové struny roztaven za pomoci elektronového paprsku nebo laseru. Tato technologie je výhradně využívána pro tisk kovových dílů. [25, 29]

Pro tvorbu dílu touto technologií je nutné použít velmi silných podpor ze stejného materiálu jako je materiál součásti. Velkou nevýhodou jsou znatelné zbytky

podpor na díle. Proto využití DED spočívá především v podobě opravování velmi tvarově složitých součástí. [25, 29]

Tab. 11 Klady a zápory direct energy deposition [25, 29]

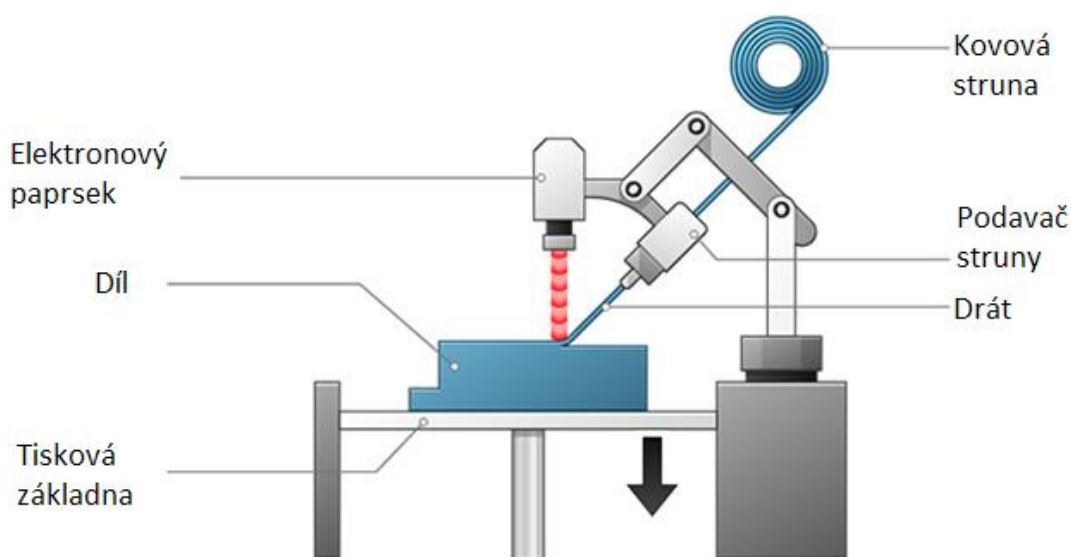
Klady	Zápory
Možnost tisku na již existující díly	Pouze pro kovy
Pevnost vytištěného dílu není ovlivněna tiskem	Drahá technologie

Tab. 12 Parametry direct energy deposition [25, 29]

Parametry tisku	Hodnota
Typ tiskového materiálu	Kovová struna/ prášek
Tloušťka tisku	Kov 0,09-0,2 mm
Maximální velikost tištěné součásti	1000x800x650 mm
Přesnost	$\pm 0,2$ mm
Podpůrné struktury	Ano

EBAM (Electron Beam Additive Manufacture)

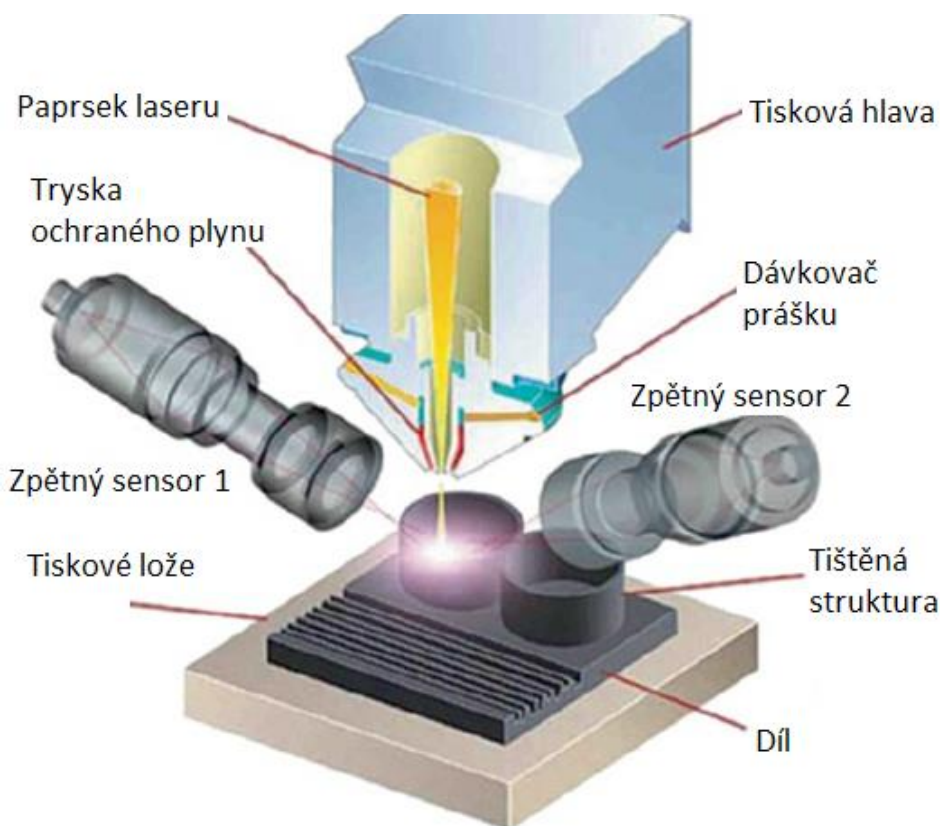
Princip EBAM je velice podobný LENS, s tím rozdílem, že namísto laseru používá elektronový paprsek (obr. 35). Dalším rozdílem je schopnost použít pro tisk jak prášek, tak i drát. Výhodou EBAM je menší energetická spotřeba, než je tomu u laseru, ale elektronový paprsek potřebuje pro svoji funkci vakuum, což je poměrně problematické v prostředí s atmosférou. Na druhou stranu, je možné použít tuto technologii ve vesmíru, pro což byla původně vyvinuta. [25,29]



Obr. 34 Popis EBAM tiskárny [29]

LENS (Laser Engineered Net Shape)

LENS pracuje na principu nanášení roztaveného kovového prášku. To je docíleno za pomoci pohyblivé hlavice (obr. 34) obsahující práškové disperzní trysky, laserovou hlavu a přívod inertního plynu, který plní funkci ochranné atmosféry. Z disperzních trysek je pouštěn kovový prášek přes paprsek laserové hlavice, který je roztaven na taveninu. Ta dopadá na povrch součásti, kde tuhne a vytváří tak novou vrstvu. Postupně se vrstvou po vrstvě vytváří kompletní díl. Nejčastěji je tisk prováděn na ploché kovové ploše součásti dílu, na kterém je například prováděna tvorba nových částí nebo jeho oprava. [25,30]



Obr. 35 Popis LENS tiskárny [30]

2.3.2 Materiály používané v aditivních technologiích

Aditivní technologie umožňují vytvářet součásti o extrémní složitosti, které dříve nebylo možné vyrobit konvenčními způsoby výroby. Na druhou stranu jsme při tvorbě tištěných součástí omezeni výběrem materiálu, kdy každá aditivní technologie dokáže zpracovávat pouze určité materiály (Tab. 13). Ty musí být pro danou technologii vždy ve specifickém skupenství, a to buď v pevném, kapalném nebo práškovém stavu. Níže budou probrány nejpoužívanější

materiály pro aditivní technologie. Z důvodu toho, že je FDM nejpoužívanější aditivní technologií (obr. 36), bude většina uvedených materiálů s touto technologií kompatibilní. [34]

Tab. 13 Materiály využívané aditivními technologiemi [31,32,33,34,35,36]

		Materiály používané pro tisk											
		PLA	ABS	HIPS	PVA	PA	PC	PETG	KERAMIKA	PEEK	ASA	SLITINY OCELI	KOMPOZIT*
Typ aditivní technologie	SLA												
	DLP												
	CDLP												
	SLS												
	SLM												
	EBM												
	MFJ												
	FDM												
	MJ												
	NPJ												
	APF												
	BJ												
	LENS												
	EBAM												

*plastová matrice + výztuž v podobě vláken/částic nejčastěji kovy, sklo, grafit



Obr. 36 Přehled nejpoužívanějších aditivních technologií [37]

PLA

PLA (kyselina polymléčná) je nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk, z důvodu nízké náročnosti pro tisk a levné pořizovací ceny. Materiál je možné vyrábět z obnovitelných zdrojů jako je například kukuřičný škrob.

Výhodami je jeho nízká tepelná roztažnost, malá deformace po vytištění a schopnost vytisknout díly o rozměrech několik desítek centimetrů. Pozitivní vlastností je i schopnost tisku na nevyhřívané desce a absence nepříjemných pachů při tisku. Hlavní nevýhodou PLA je křehkost a velmi nízká tepelná odolnost, kdy materiál začíná výrazně měknout již při teplotě okolo 60°C. [31,32,33,34,35,38]

ABS

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) je druhým nejpoužívanějším polymerem pro 3D tisk. Oproti PLA má ABS vyšší tuhost a odolnost vůči vysokým teplotám (měkne při teplotě 105 °C). Dále se vyznačuje dobrou rázovou houževnatostí a vysokou chemickou a korozní odolností. Jeho nevýhodou je poměrně velké smrštění při chladnutí, které negativně ovlivňuje tvar tištěné součásti v podobě výrazné deformace. Druhou negativní věcí je uvolňování nepříjemného zápachu při tisku. Velmi časté použití tohoto materiálu je v polymerní směsi PC/ABS, protože takto vyrobené díly mají dostatečnou pevnost, aby nahradily vstřikované součásti. Často jsou používány při výrobě prototypových součástí. [31,32,33,34,35,38]

HIPS

HIPS (Houževnatý polystyren) je pevný, neflexibilní materiál s nižší tepelnou roztažností než ABS, ale jinak podobnými mechanickými vlastnostmi, jeho teplota tavení je okolo 230 °C. Využití HIPS je převážně pro tisk podpurných konstrukcí, díky jeho chemickému složení je rozpustný za pomoci limonenu (jedná se o uhlovodík klasifikovaný jako cyklický terpen). Tato vlastnost je velmi často využívána při odstraňování podpor z dílu. Podobně jako u ABS je při tisku tohoto materiálu nutné používat vyhřívanou základnu pro snížení deformací dílu při tisku. Dále je nutné kvůli uvolňujícím se výparům při tisku větrat. [31,32,33,34,35,38]

PVA

Podobně jak HIPS, tak i PVA (Polyvinylalkohol) je používán především pro podpurné konstrukce součástí. Protože je měkký a biodegradovatelný, není vhodný pro tisk součástí. Na druhou stranu je možné ho rozpustit v teplé vodě což oproti HIPS, který potřebuje k rozpuštění další chemikálii, je velká výhoda. Největší nevýhodou PVA je jeho vysoká navlhavost, kvůli které je nutné ho skladovat ve vzduchotěsné nádobě. [31]

PA/NILON (Polyamid/Nylon)

Polyamid je jeden z nejpružnějších materiálů použitelných pro 3D tisk. To je také jeho hlavní výhodou oproti PLA a ABS, které jsou křehké. Teplota tavení PA je okolo 120 °C. Problém tohoto materiálu je především nutnost skladovat ho v uzavřené nádobě, protože má tendenci velmi navlhát. To při tisku může způsobovat výrazné deformace dílu a nízkou adhezí mezi vrstvami dílu, které mohou vést k delaminaci vrstev od sebe. [31,36,38]

PC

Polykarbonát (PC) je tuhý, transparentní materiál. Jeho hlavní výhodou je schopnost odolávat teplotám okolo 150 °C a tudíž je možné ho použít pro díly namáhané teplem. Díky své přirozené pevnosti je možné díly vytištěné z tohoto materiálu silově zatěžovat. Hlavním záporem PC je nutnost tisku za velmi vysokých teplot, kdy je vhodné mít i vyhřívanou komoru. Dále je poměrně problematické skladování, kdy podobně jak u PA je PC velmi náchylný k navlhání, které při tisku způsobuje deformace dílu a někdy i delaminaci vrstev od sebe. [31]

PETG

PETG (polyetylentereftalátglykol) je plast speciálně vytvořený pro použití v 3D tisku. Vychází z PET, kdy se do něj v průběhu výroby přidává glykol. Ten způsobuje, že je PETG méně křehký než PET. Dalšími jeho vlastnostmi jsou pevnost, vysoká odolnost proti nárazům a vysoká flexibilita. Díky těmto nim a skutečnosti, že má menší smrštění, než ABS je velmi často používán jako jeho náhrada. Vytištěné součásti z tohoto materiálu mohou být pevnostně zatěžovány. [35,38]

PEI

PEI (Polyeterimid) je materiál specifický svou vysokou teplotní odolností, kdy si při vysokých teplotách dokáže zachovat své mechanické vlastnosti. Nevýhodou pro použití tohoto materiálu je náročnost tisku, kdy je nutné ho zpracovávat při teplotách okolo 350°C. Dále je nezbytné před tiskem materiál vysušit. [34,38]

PEEK

Podobně jak u PEI je PEEK (Polyetereterketon) schopný zachovat si své mechanické vlastnosti při vysokých teplotách. Teplota zpracování se pohybuje okolo 400°C. To znamená, že většina cenově dostupných tiskáren není schopna zpracovávat tento materiál a je nutné použít pro tisk profesionální stroje. Dalším výrazným záporem tohoto materiálu je jeho velmi vysoká cena. [32,38]

ASA

ASA (Akrylonitrilstyrenakrylát) je materiál převážně používaný pro součásti, které jsou vystaveny venkovním vlivům, díky jeho vysoké odolnosti vůči UV záření. Ostatní parametry jsou velice podobné ABS. Pro velmi hladký povrch dílu je možné ho vyhladit acetonem. Teplota tisku se pohybuje okolo 270 °C. Nevýhodou materiálu je jeho cena a nepříjemné výpary uvolňující se při tisku. [31,35,38]

Kompozity

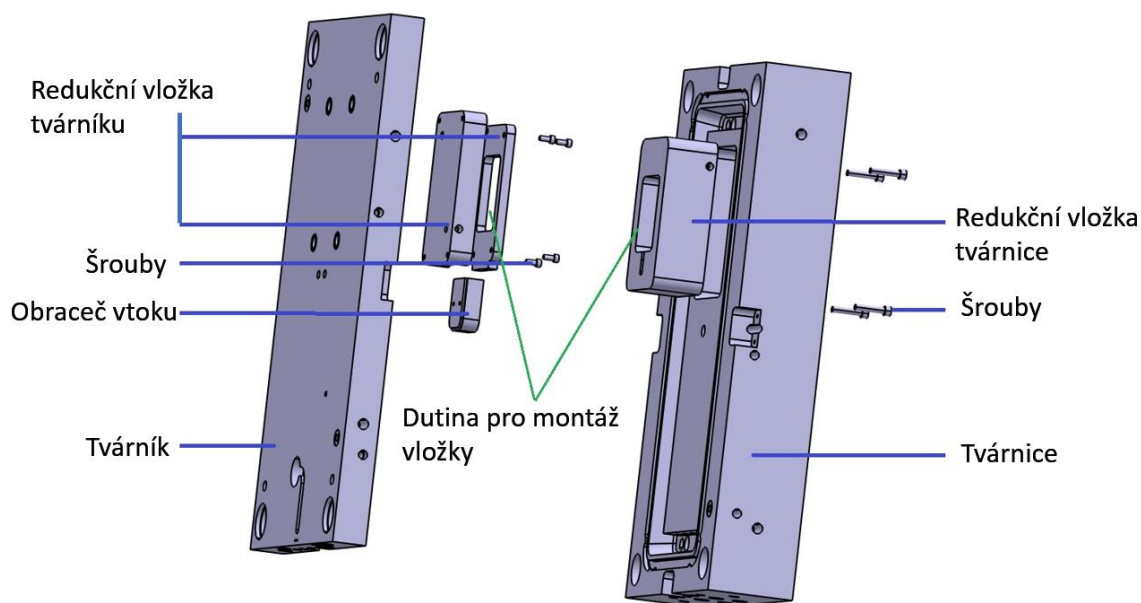
Kompozitní materiály pro aditivní technologie lze rozdělit do dvou skupin. První používá ABS matrici a výztuž z uhlíkových vláken. Druhá má matrici z PLA a výztuž z uhlíkových vláken, nebo kovových částic. Uhlíková vlákna zvyšují pevnost materiálu. Díly vytištěné s tímto materiálem dokáží plně nahradit díly sériové výroby. Kovové částice zvyšují tepelnou vodivost materiálu. [31]

3. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývala volbou materiálů pro konstrukci vložky formy a vstřikovaného dílu. Konstrukcí dílu a vložky formy, která obsahovala temperační kanály. Dále byl probrán tisk zkušebních etalon a vložky formy, opracování vložky formy její zkoušení funkčnosti. Následně byla otestována životnost vložky formy rozměrová přesnost vstřikovaných dílů a měření teploty dílů a vložky formy.

3.1 Konstrukce rámové formy

Rámová forma (obr. 37), do které byla umístěna vložka formy, se skládala z rámu tvárníku, rámu tvárnice a redukční vložky, která sloužila jako redukce pro navrženou vložku formy vyrobenou pomocí 3D tisku. Forma je speciální tím, že vtoková soustava vede na tvárníku a následně je převrácena na tvárnici.

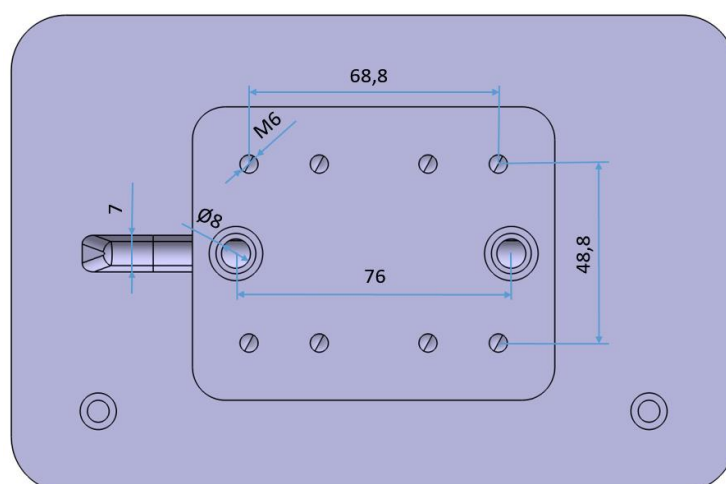


Obr. 37 Složení rámové formy použité pro vstřikování

Návrh konstrukce vstřikovaného dílu a vložky formy byly ovlivněny následujícími parametry vycházející ze zadání diplomové práce a konstrukčního prostoru rámové formy, které jsou následující:

- Konstrukční prostor velikost vložky formy 62x80x100 mm
- Přívod vtokové soustavy tvaru lichoběžníkového kanálu o velikosti 7 mm
- Výška umístění vtoku udávala počátek dělící roviny vložky formy
- Temperační kanály se dvěma vstupy o průměru 8 mm, jeden pro přívod a druhý pro odvod temperačního média

- Připevnění vložky formy bylo za pomoci čtyř šroubů M6 (obr. 38)



Obr. 38 Detail pozice vtoku, temperačních kanálů a připevňovacích šroubů M6

- Použití tepelně vodivého termoplastického materiálu na výrobu vložky formy
- Tisk vložky formy technologií FDM
- Konstrukce temperačních kanálů kopírující tvar dutiny formy.

3.2 Volba materiálů dílu a vložky

Před konstrukcí dílu a vložky formy bylo nutné zvolit konstrukční materiály, protože jejich vlastnosti ovlivňují vzdálenost temperačních kanálů od dutiny vložky formy, zaformovací úhly dílu a navýšení velikosti dutiny formy o smrštění materiálu dílu.

3.2.1 Volba materiálu dílu

Pro volbu materiálu dílu byl z důvodu jeho nenáročnosti (nízké teploty zpracování, dobrá tuhost, atd.) pro vstřikování zvolen PP+EPDM-TD15 SABIC PPC 8750U (více materiálový list – příloha č. 1). Materiál neobsahuje dlouhá skelná vlákna, která by svými abrazivními vlastnostmi mohla výrazně snížit životnost plastové vložky formy. Hustota materiálu byla 1010 kg/m^3 .

3.2.2 Výběr materiálu plastové vložky formy

Kritériem výběru materiálu vložky formy bylo použití existující aditivní technologie ve firmě. Z tohoto důvodu byla použita tiskárna typu FDM, přesněji zařízení Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 z důvodu nízké ceny tisku a případně i oprav.

Kvůli zvolenému materiálu dílu nesměl být materiál vložky formy kompatibilní s materiálem dílu, aby se zabránilo difuznímu spojení materiálů dílu a vložky formy do sebe během procesu vstřikování (vysoká teplota a tlak). Další podmínkou volby byl požadavek na poměrně vysokou teplotní odolnost, protože materiál dílu byl vstřikován při teplotě okolo 230 °C. Samotná volba materiálu probíhala zkoumáním tří možných materiálových variant.

První variantou byla příprava a výroba vlastního materiálu. Granulát ABS, byl smíchán s 50 % kovového prášku a následně přetvořen za pomoci extrudéru na strunu o průměru 1,75 mm. Toto řešení nebylo použito proto, protože nebylo možné vytvořit na extrudéru strunu o průměru 1,75 mm, kterou využívá zařízení PRUSA. Také nebylo možné zaručit rovnoměrnou dispergaci kovového prášku v matrici a zajistit funkčnost materiálu pro tisk (adheze vrstev mezi sebou, spojitost plniva a matrice).

Druhou variantou bylo použití vysoce teplotně odolného materiálu PEEK nebo PEI na tisk. Ty sice bylo možné zakoupit v podobě tiskové struny, ale bohužel zařízení PRUSA není schopno tisknout tyto materiály z důvodu velmi vysoké teploty tavení (340 °C) při tisku. Navíc by byl problém s nízkou teplotní vodivostí, která neumožňuje otestovat funkčnost temperačních kanálů.

Třetí variantou bylo použití nového materiálu používaného výhradně pro FDM tisk. Jednalo se o materiál HTPLA s obsahem kovových částic. Toto řešení by umožnilo tisk materiálu o podobných vlastnostech jako je PLA. Svou tepelnou odolnost získává až po následném spékání materiálu. Nevýhodou tohoto řešení byla nutnost spékat formu po tisku a také nutnost zvětšit dutinu modelu o velikost spékání, která v osách XY je jiná, než v ose Z, což může zanechat nepřesnost do rozměrů vyrobených dílů.

Z uvedených variant, z hlediska jejich výhod a nevýhod, byla vybrána třetí varianta, která splňovala požadavky na vysokou teplotní odolnost, tepelnou vodivost a schopnost tisknout na zařízení PRUSA. Pro experimentální řešení tedy byly použity materiály společnosti Proto-pasta, která se specializuje na výrobu tiskových strun pro FDM tiskárny se zaměřením na vysokoteplotně odolné PLA.

Pro tisk vložky formy byl z portfolia firmy zvolen materiál Proto-pasta Cooper Fill HTPLA (obr. 39) který se vyznačuje vysokou teplotní odolností a možností vyleštit

povrch materiálu do hladka, což je výhodou z hlediska odformování dílu z dutiny vložky formy. Vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 14, podrobnější vlastnosti jsou uvedeny vidět v příloze č. 2.[39]



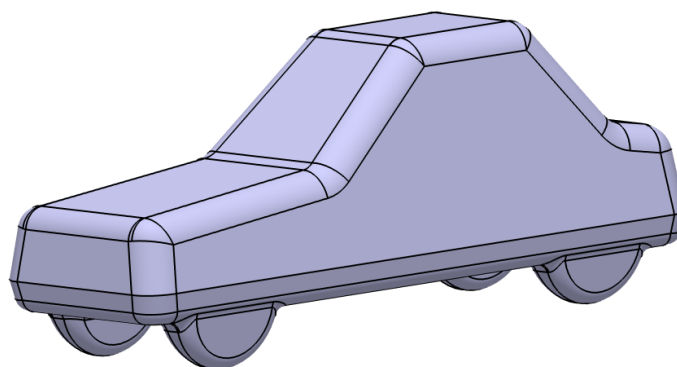
Obr. 39 Vytištěný díl z Proto-pasta Cooper Fill HTPLA po tisku a následném vyleštění

Tab. 14 Vlastnosti materiálu Proto-pasta Cooper Fill HTPLA [39]

Parametr	Hodnota
Základní matrice	HTPLA (vysokoteplotně odolné PLA)
Plnivo	Měděný prášek
Velikost plniva	0,25 mm
Hustota	Cca 2300 kg/m ³
Teplota spékání	110 °C po 10 a více minut
Teplota skelného přechodu Tg před spékáním	50–60 °C
Teoretická teplota tvarové stálosti po spékání (HDT)	140 °C
Smrštění po tisku	0 % v X/Y/Z

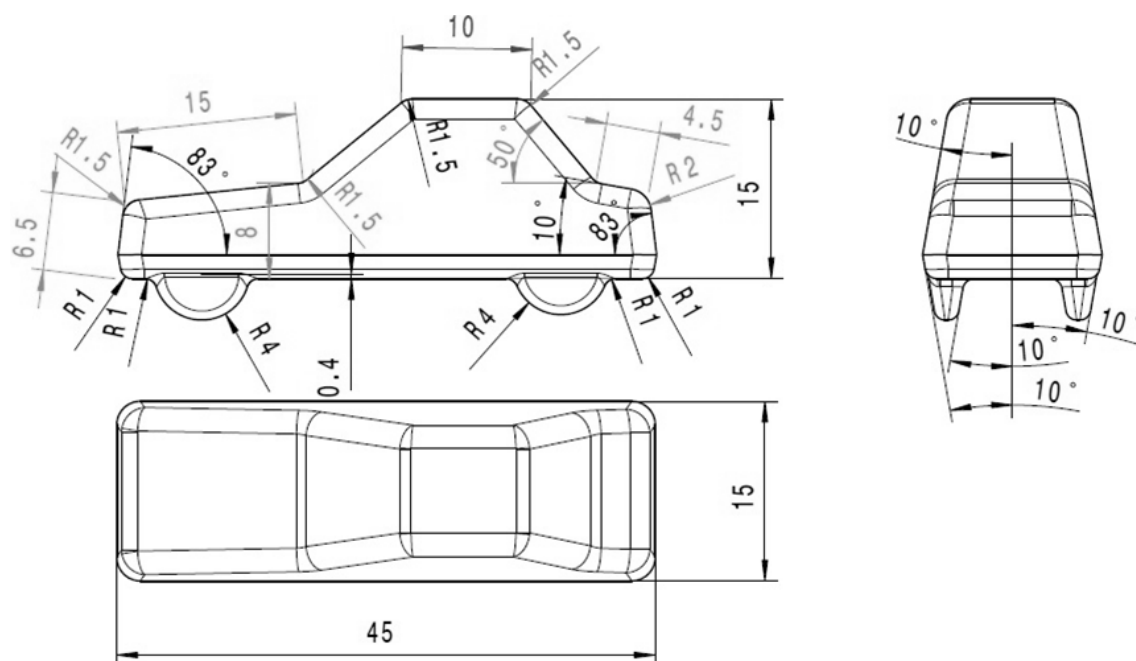
3.3 Návrh vstřikovaného dílu

Program použitý pro konstrukci dílu a vložky formy byla CATIA V5 R28. Před návrhem vlastní vložky formy byl proveden návrh tvaru vstřikovaného dílu, pro který byla vložka formy konstruována. Pro vyhodnocení vlivu a funkce temperačních kanálů byl návrh směřován do dílu o velkých tloušťkách. Protože tento parametr nesplňovala žádná součást vyráběná v Magna Exteriors (Bohemia) s.r.o., byl zvolen tvar jednoduchého automobilu (obr. 40).



Obr. 40 Návrh modelu automobilu

Tvar dílu měl záměrně velké změny objemu jednotlivých částí dílu pro cílené měření chladicí schopnosti formy (teplotních polí) za pomoci termokamery. Formovací úhly byly, až na dvě výjimky, minimálně o velikosti 10° . To mělo zaručit snadné odformování dílu z plastové vložky formy. Díl byl zaformován napřímo, kdy dělicí rovina vedla spodní částí automobilu. Z důvodu omezené velikosti vložky formy (rozměry 62x80x100 mm), která byla následně zastavěna do rámu formy, bylo nutné dimenzovat rozměr dílu tak, aby bylo možné do formy zapracovat i temperační rozvody. Z tohoto důvodu byly celkové rozměry modelu automobilu 45x15x18 mm. Plnění dílu ze zadní části modelu automobilu „výfuku“. Geometrii a rozměry dílu lze vidět na obr. 41.



Obr. 41 Rozměry dílu

Objem dílu byl dle CAD 6,352 cm³. Hmotnost vstříkovaného dílu byla 6,42 g.

3.4 Konstrukční návrh vložky formy

Konstrukce vložky formy byla složena z mnoha postupných kroků, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

3.4.1 Výpočet rozměru dutiny vložky formy

Z důvodu smrštění taveniny plastu vstřikovaného do dutiny formy bylo nutné zvětšit dutinu formy o objemové smrštění vstřikovaného plastu při jeho chladnutí (K_d). Hodnota byla vypočtena podle rovnice (1). Uvažováno bylo pouze smrštění dílu. [2]

$$K_d = \frac{100 * \frac{s_p}{100 - s_p} + 100}{100} \quad (1)$$

kde:

K_d = objemové smrštění vstřikovaného plastu při chladnutí %

s_p = parametr smrštění, pro polypropylen $s = 0,6$ z materiálového listu

Po doplnění do rovnice pro výpočet smrštění dílu z polypropylenu, vyšla následující hodnota:

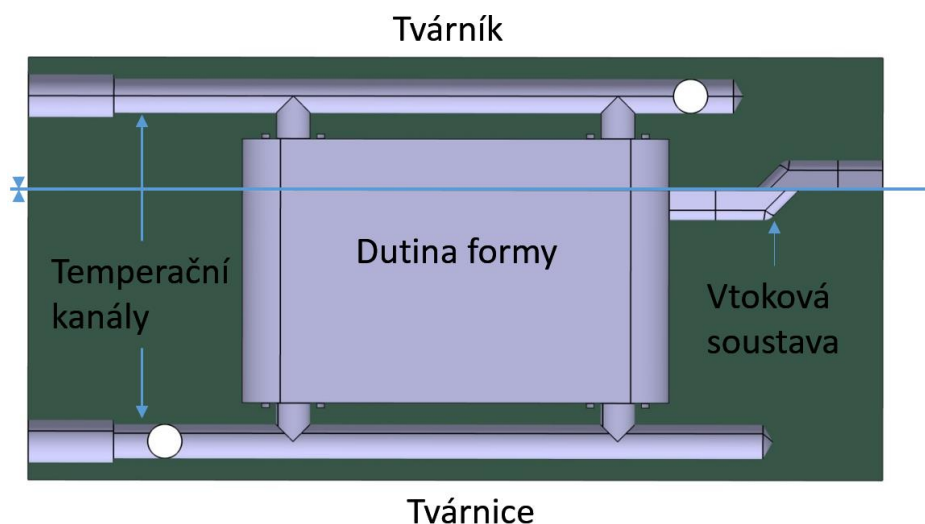
$$K_d = \frac{100 * \frac{0,6}{100 - 0,6} + 100}{100}$$

$$K_d = 1,006 \%$$

Na základě výpočtu je potřeba zvětšit dutinu formy o 1,006 % (zaokrouhleno na 1 %) ve všech směrech a pro všechny rozměry dílu. I když byl tvar dutiny vložky formy negativem vnějších ploch vstřikovaného dílu, nebylo možné ji vytvořit za použití nominálních rozměrů z důvodu smrštění dílu po vstřikování. Proto byla použita již dříve vypočtená hodnota objemového zvětšení, o kterou byly rovnoměrně zvětšeny rozměry v osách X, Y, Z.

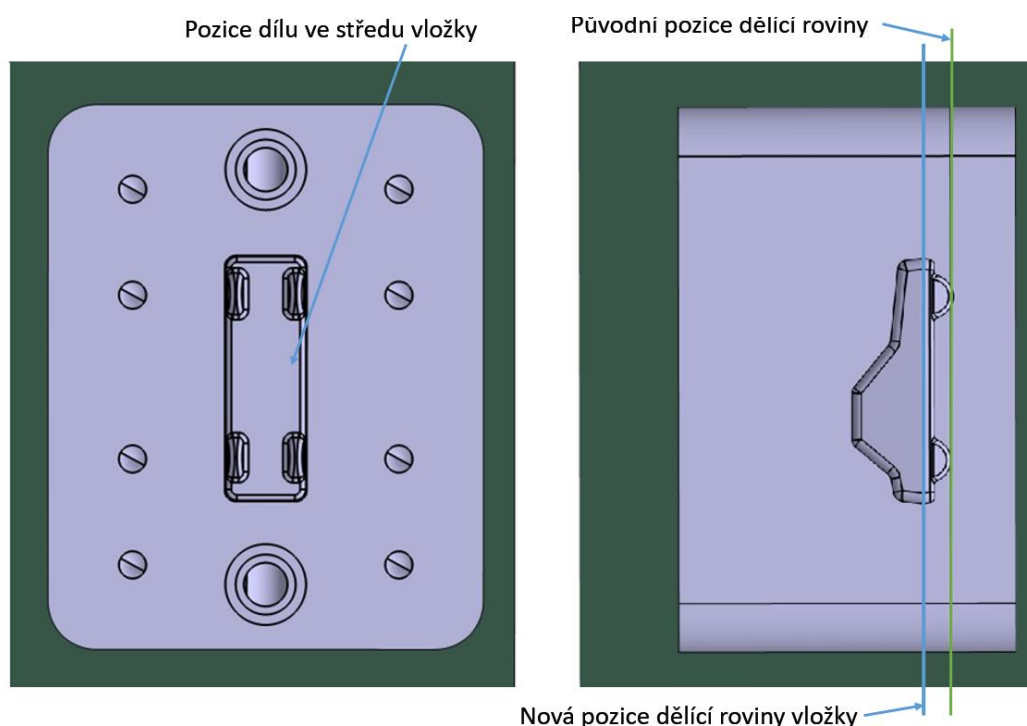
3.4.2 Konstrukce plastové vložky formy

Na obr. 42 je řez redukční vložkou s volnou dutinou, do které byla umístěna 3D tiskem vyrobená vložka formy.



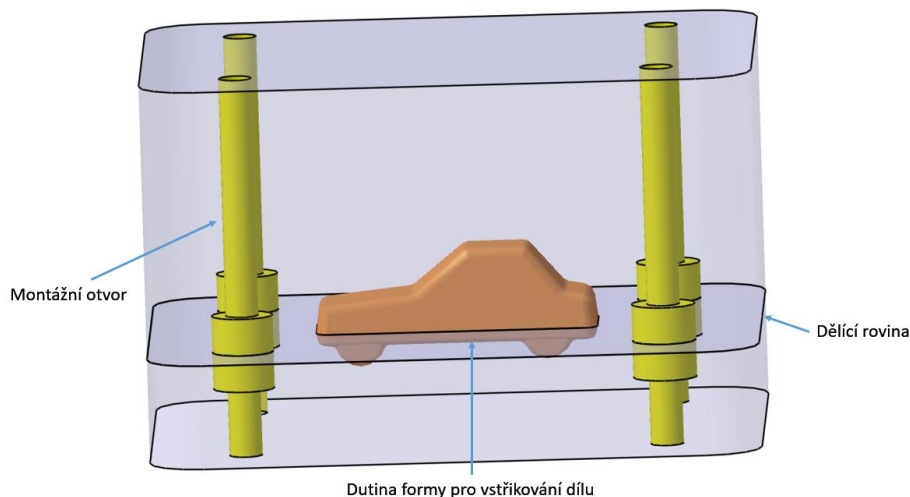
Obr. 42 Prostor pro umístění dílu

Kvůli materiálu vložky formy z HTPLA, bylo nutné při její konstrukci počítat s co největší tloušťkou mezi vtokem a temperačním kanálem, protože při vstřikování dílu by mohlo dojít k výraznému měknutí materiálu vložky formy a následnému prolomení stěny mezi vtokovým systémem a temperačními kanály. Z tohoto důvodu byla posunuta dělicí rovina vložky formy o 5 mm vůči původní dělicí rovině redukční vložky, čímž byl zvětšen konstrukční prostor tvárníku vložky formy. Umístění dutiny pro výrobu dílu bylo do středu formy (obr. 43), kdy dutina byla naorientována tak, že ústí vtoku se nacházelo v zadní části dílu (oblast zadního nárazníku a kufru modelu automobilu).



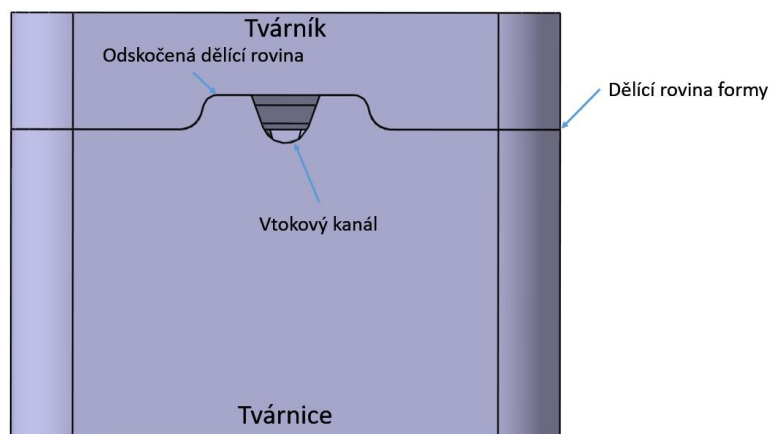
Obr. 43 Umístění dutiny dílu do vložky formy

Poté byly vytvořeny čtyři montážní otvory s odsazením pro šrouby (obr. 44). Jelikož jejich pozice je pevně stanovena, bylo nutné se při konstrukci ostatních částí vložky formy vyvarovat kolizi s těmito otvory. K montáži byly použity „imbusové“ šrouby s válcovou hlavou M6. Odsazení bylo konstruováno dle ČSN 02 1024.



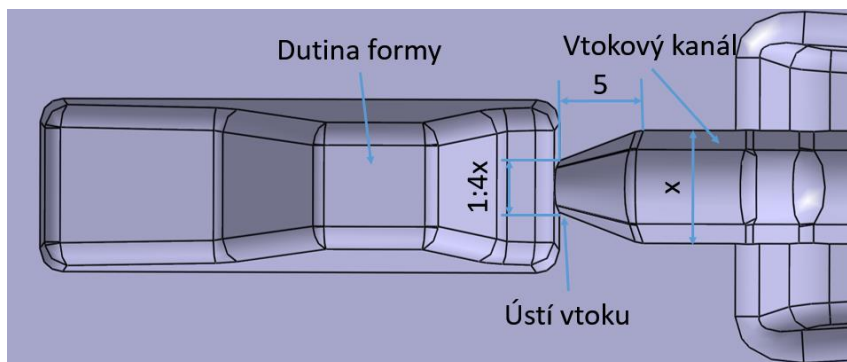
Obr. 44 Vzhled dutiny dílu ve formě a montážních otvorů

Výpočet a konstrukce vtokové soustavy a jejich rozvodů nebyl proveden, byl již určen vtokem rámové vložky. Velikost (rozměry) jsou v důsledku toho větší, než by bylo vhodné pro takto malý výrobek. Na druhé straně se jedná o stavebnicové řešení, které má i své výše uvedené nevýhody. Vtokový kanál je poměrně velkého průřezu (lichoběžníkový kanál o šířce 7 mm), proto bylo nutné spolu s posunem dělicí roviny formy posunout i vtokovou soustavu. Tloušťka vložky formy od stěny kanálu byla minimálně 5 mm (obr. 45). Díky těmto úpravám bylo možné vstřikovat taveninu daným rozvodem bez změny průřezu vtokového kanálu. [16]



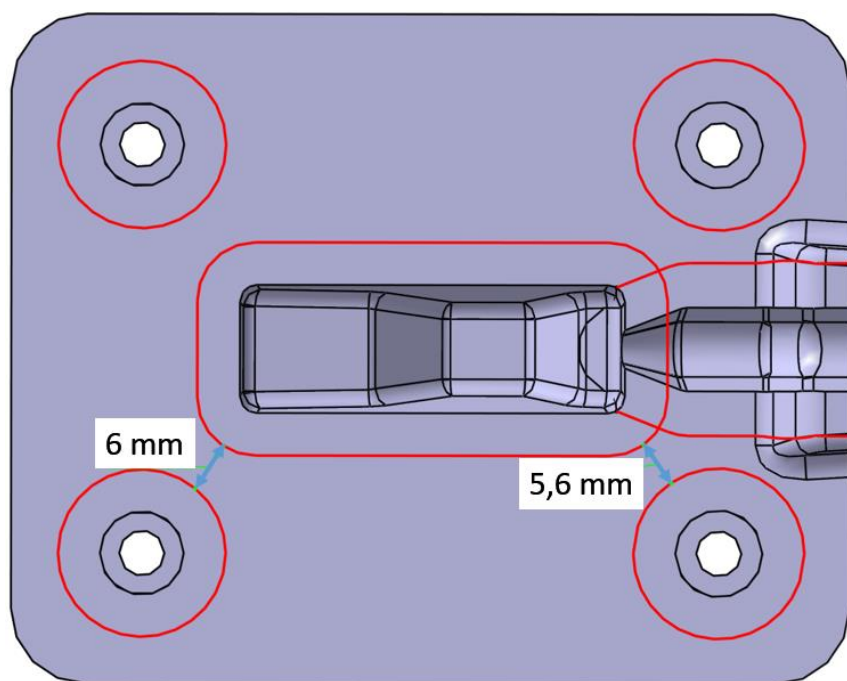
Obr. 45 Vtokový kanál s posunem dělicí roviny pro správné vedení vtokového kanálu

Ústí vtoku (obr. 46) bylo zúženo v poměru 1:4 vůči velikosti průřezu vtokového kanálu z důvodu snazšího odstranění vtoku od vstřikovaného dílu. Pokud by toto zúžení způsobovalo problémy (bude velké nebo naopak malé), lze ho dodatečně rozšířit nebo omezit. [16]



Obr. 46 Ústí vtoku

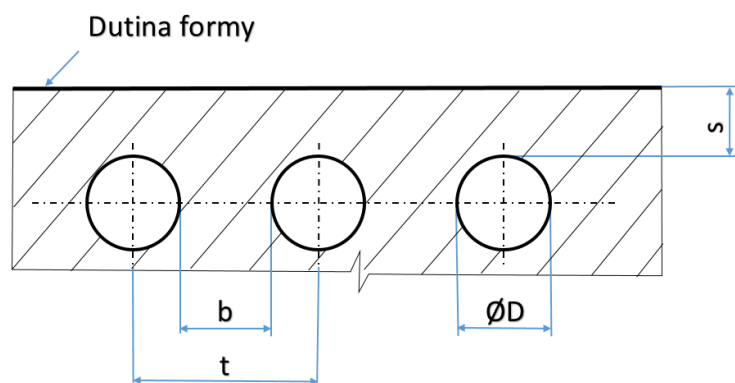
Konstrukce temperačních kanálů začala určením maximálního konstrukčního prostoru pro temperační kanály vůči ostatním částem vložky formy (obr. 47). Na základě znalostí ohledně doporučení vzdáleností temperačních kanálů u ocelových forem byly pro vložku zvoleny parametry dle tab. 15 a obr. 48. Průměr temperačního kanálu byl zvolen o velikosti 4 mm, protože průřez čtyř těchto kanálů je roven průřezu vstupního 8 mm kanálu. Tyto parametry byly velice podobné parametrům pro ocelové formy s temperačním kanálem o průměru 6 mm. [16]



Obr. 47 Ukázka možnosti rozměrů pro vedení temperačních kanálů

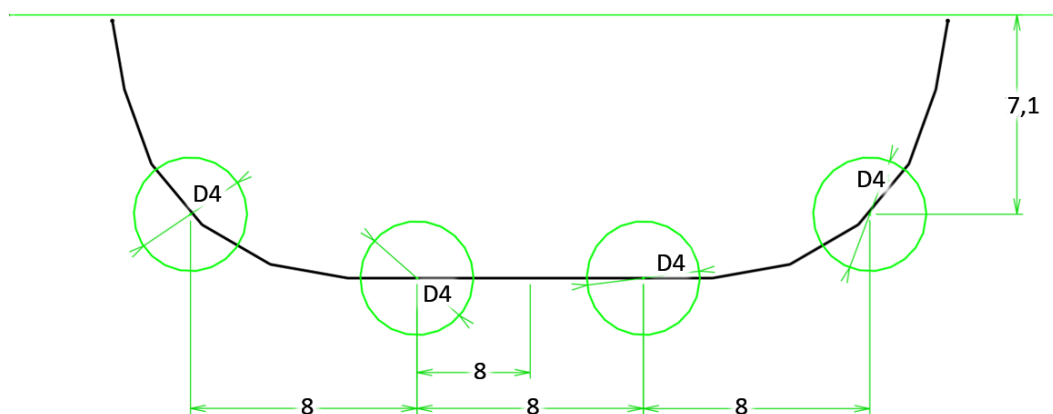
Tab. 15 Zvolené hodnoty [16]

Materiál formy	ØD [mm]	S [mm]	t [mm]	b [mm]
Zvolené hodnoty pro HTPLA	4	4	8	5



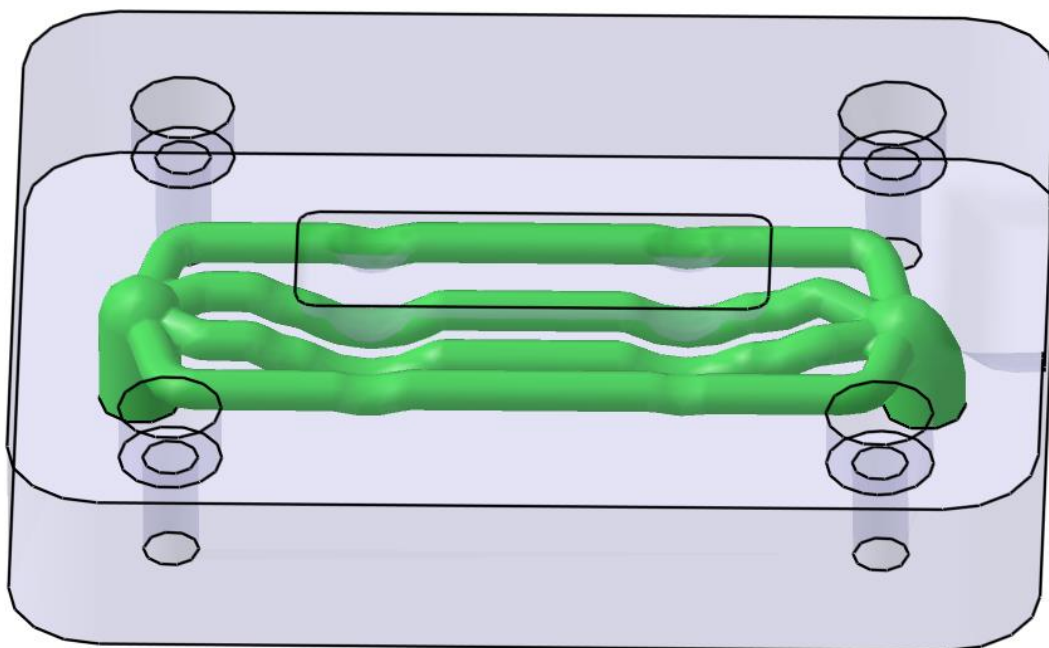
Obr. 48 Geometrie parametrů tab. 16. [16]

Rozmístění temperačního rozvodu tvárníku vzhledem k dutině formy bylo řešeno přesným kopírováním tvaru dílu, čímž byla plně využita výhoda výroby za pomoci FDM tisku. U tvárníku při dodržení parametrů z tab. 15 byly nakonstruovány 4 kanály paralelně vedené podél dílu (obr. 49). Kritickou oblastí pro umístění kanálu bylo místo spodku automobilu (oblast kola) s konstrukčním prostorem o velikosti 2 mm při zachování parametrů z tab. 15. Z tohoto důvodu byl kanál v tomto místě veden pouze 4 mm od dutiny formy.



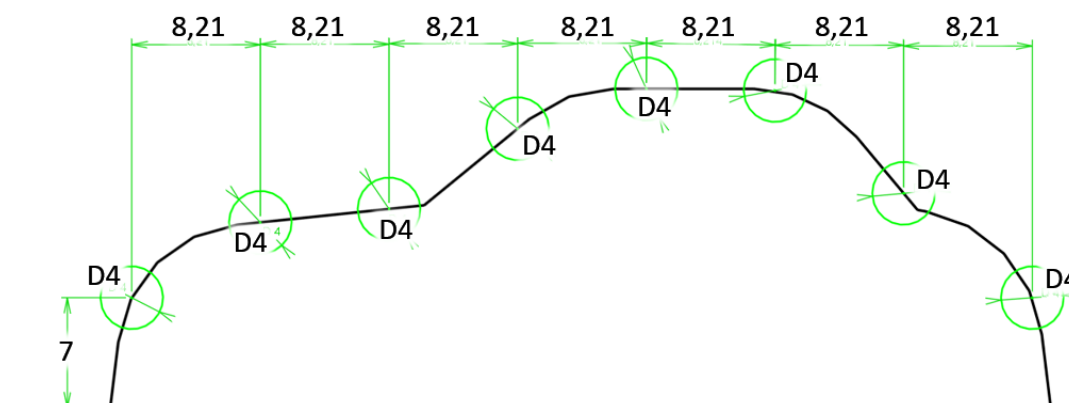
Obr. 49 Rozmístění chladících kanálů tvárníku

Konstrukční návrh temperačního okruhu tvárníku je ukázán na obr. 50. Na začátku a na konci temperační kanály ústí do hlavního vstupního a výstupního kanálu o průměru 8 mm.

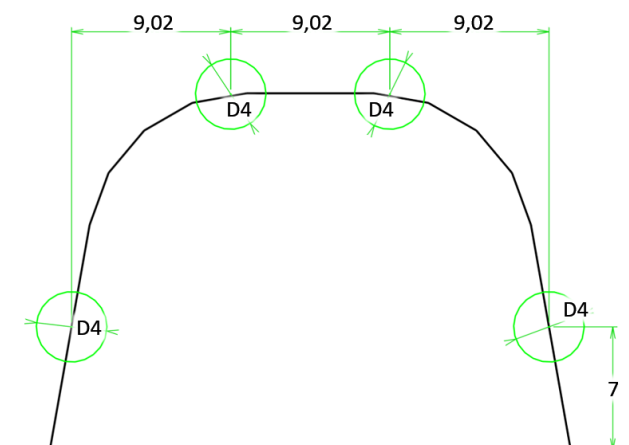


Obr. 50 Konstrukční návrh tvárníku s temperačním rozvodem

Konstrukční prostor tvárnice byl na rozdíl od tvárníku mnohem větší. Jedinou komplikací při návrhu temperačního okruhu byl počet temperačních kanálů a jejich rozmístění pro rovnoměrné chlazení dutiny formy. Dle schématu (obr. 51) v rovině XY vycházel počet rovnoměrně rozmístěných kanálů na 8. U řezu v rovině Y, který byl umístěn v místě největšího průřezu (řez byl veden přes střechu automobilu, obr. 52) vycházel minimální počet temperačních kanálů na 4. Pro tento počet byl také proveden návrh rozmístění.

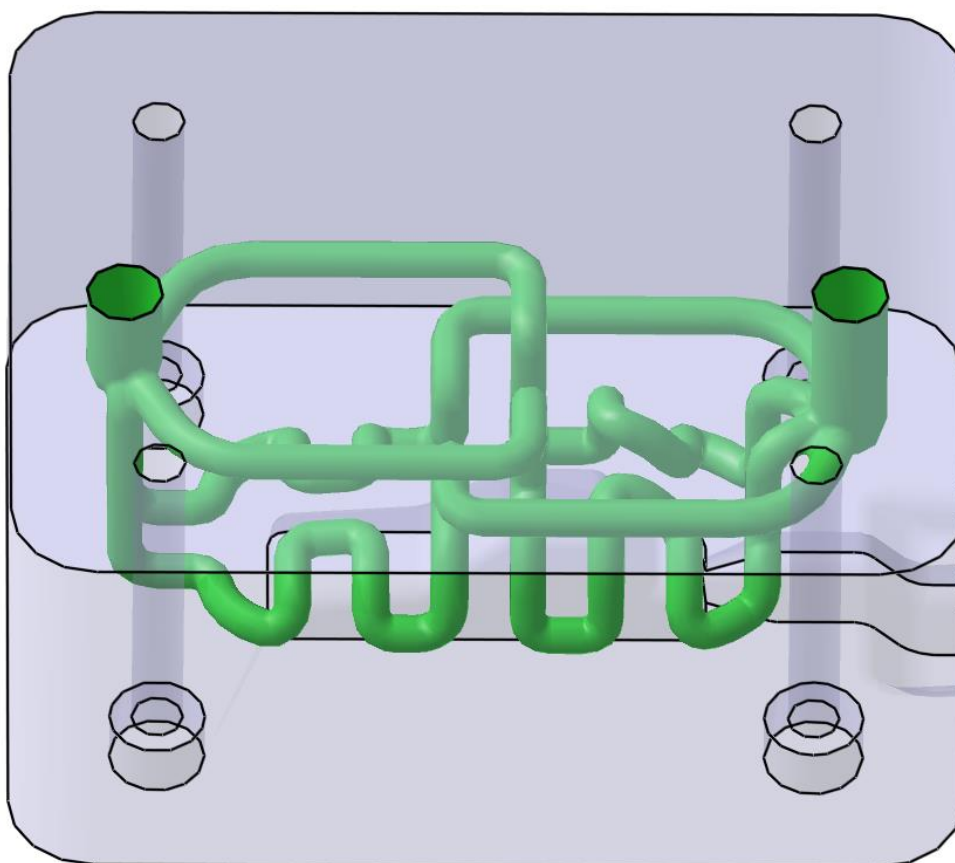


Obr. 51 Rozmístění chladících kanálů tvárnice v rovině XY



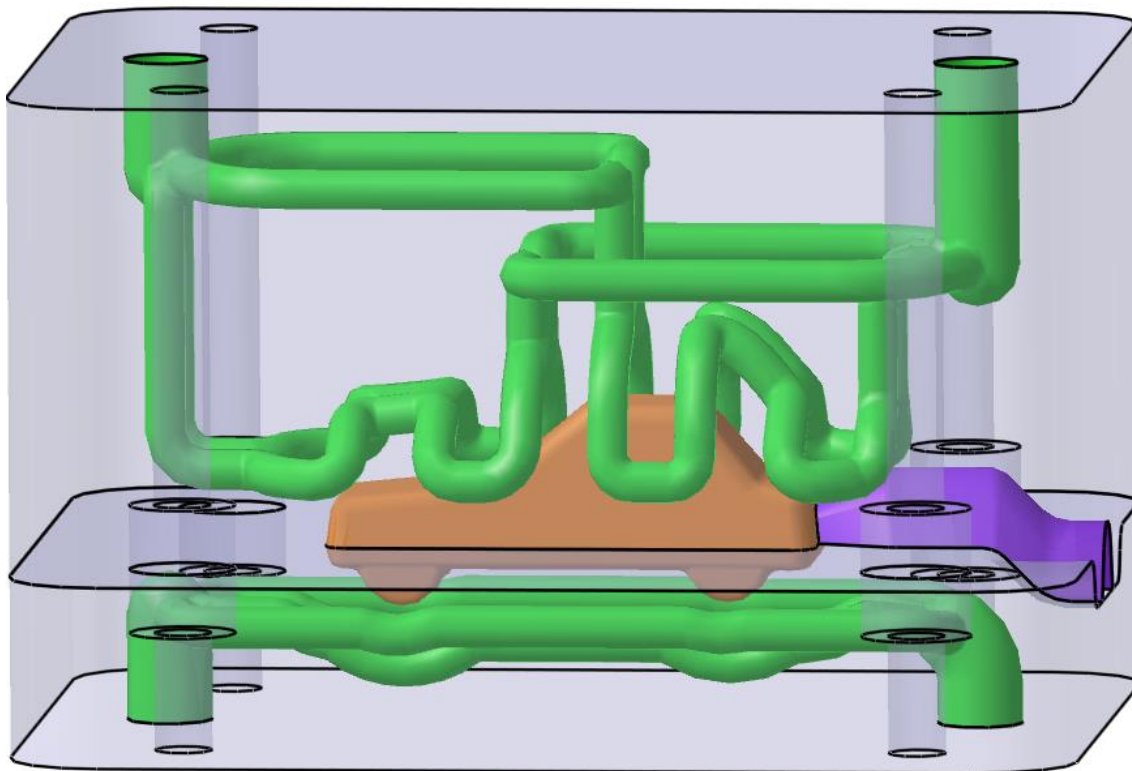
Obr. 52 Rozmístění chladících kanálů tvárnice v rovině YZ

Tvar a geometrie rozvodu kanálů byla oproti tvárníku, kde byly vedeny podélně, mnohem složitější. A to z důvodu výrazné změny tvaru dutiny v ose Y. Tvar a geometrie rozvodu kanálu byla vedena podél osy X a Y, kdy v 8 mm rozestupech vznikla zalomení. Tímto způsobem bylo možné rovnoměrně pokrýt všemi kanály plochu celé dutiny (obr. 53). Protože bylo chlazení tvárnice tvořeno čtyřmi 4 mm kanály, které ústily z hlavního přívodu, byla konstrukce provedena tak, že jeden kanál chladil vždy jednu čtvrtinu dutiny formy.



Obr. 53 Konstrukční návrh tvárnice s temperačním rozvodem

Celkový konečný návrh konstrukce vložky formy je ukázán na obr. 54. Předpokládaná hmotnost vložky formy byla celkem 1052 g. Z toho 284 g vážil tvárník a 768 g tvárnice.



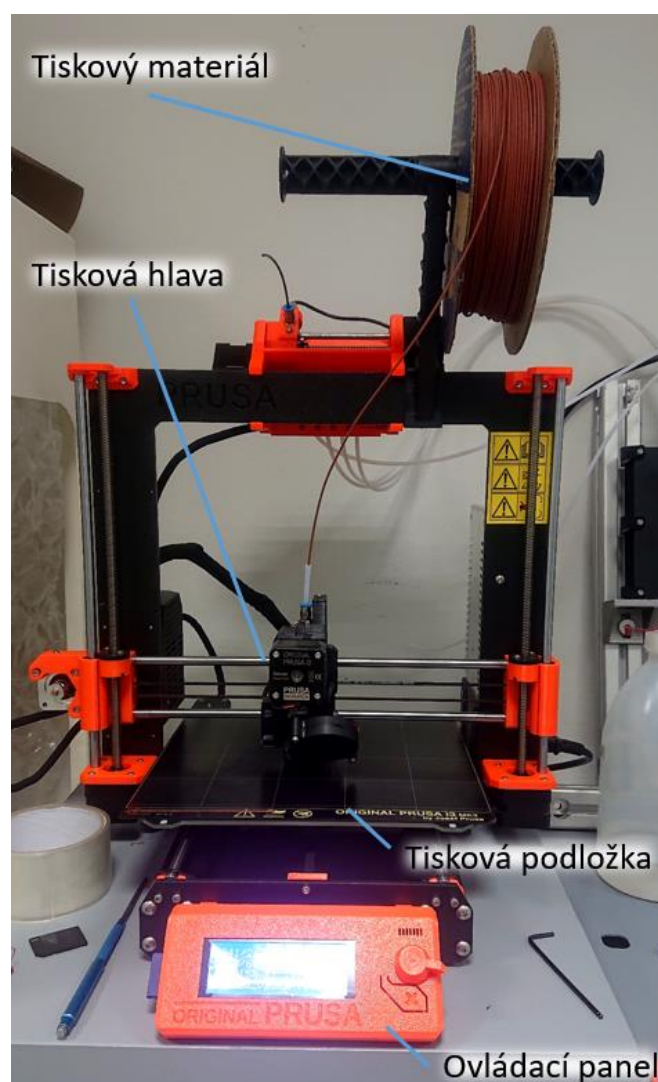
Obr. 54 Celkový konstrukční návrh vložky formy

3.5 Zařízení použité pro tisk

Zařízení použité pro tisk byla tiskárna typu FDM, tiskárna Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 (Obr. 55). Důvodem její volby byla nízká pořizovací cena a levná oprava při případném poškození. Základní parametry této tiskárny jsou uvedeny v tab. 16. Z důvodu tisku abrazivního materiálu bylo nutné vyměnit standardně dodávanou tiskovou trysku za tvrzenou.[35]

Tab. 16 Parametry tiskárny Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 [35]

Pracovní prostor	250 x 210 x 210 mm
Výška vrstvy	0,05 – 0,35 mm
Rychlost	200+ mm/s
Maximální teplota extruze	300 °C
Tiskový povrch	magnetická podložka / vyměnitelný tiskový plát s PEI
Počet extruderů	4
Podporované materiály	Všechny termoplasty
Senzor filamentu	Ano (mechanický)
Ochrana před výpadkem proudu	Ano
Senzory	4 termistory, senzory větráčků, zaseknutého extruderu a posunu vrstev
Kalibrace	automatická 9 bodová / kompenzace zkosení os X a Y



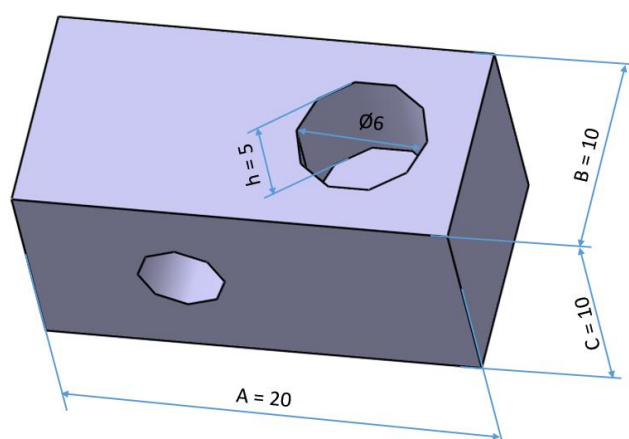
Obr. 55 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 Multi Material 2.0 [35]

3.6 Výroba vložky formy a nastavení parametrů pro tisk materiálu

Před tiskem vložky formy bylo nutné nastavit tiskové parametry pro daný materiál a dále ověřit velikosti smrštění po spékání. Z tohoto důvodu byl před vlastním tiskem vložky formy vytvořen etalon, zkušební těleso, pro ověření výrobcem udávaných parametrů:

- 1) Smrštění materiálu vložky formy po tisku by mělo být 0 %.
- 2) Smrštění materiálu vložky formy po spékání by mělo být 1,5 % v osách X a Y. V ose Z by měl být nárůst 1 %.

Etalon měl tvar kvádru o rozměrech 20x10x10 a obsahoval dutinu o průměru 4 mm simulující temperační kanál (obr. 56).



Obr. 56 Zkušební etalon se základními rozměry a popisem

Tisk etalon probíhal dle parametrů udávaných výrobcem materiálu tab. 17. Úplné nastavení je popsáno v příloze 3.

Tab. 17 Parametry tisku dle výrobce materiálu

Parametr	Hodnota
Teplota tiskové trysky	220 °C
Výška vrstvy tisku	0,15 mm
Plnění	100 %
Počet kontur	5
Chlazení ventilátorem	Ano

Výsledkem prvního zkušební tisku (obr. 57) byl díl s nedokonalým vyplněním vrstev, které bylo možné oddělit za použití rukou. V některých vnitřních oblastech etalonu nebyly vrstvy ani spojeny a propojeny.



Obr. 57. Delaminace vrstev na etalonu

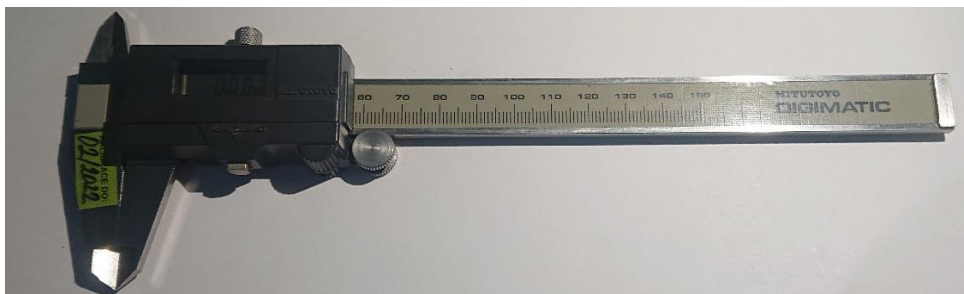
Pro eliminaci tohoto problému byly následně zkoušeny různé teploty tisku, rychlosti tiskové hlavy, tloušťky a velikosti tištěného objemu, ze kterých vyšly finální parametry nastavení tisku, které jsou uvedeny v příloze č. 4. Nejvýznamněji adhezi vrstev ovlivnila teplota tisku, která byla nastavena na teplotu 240 °C. Bylo však nutné kompletně vypnout dva chladící ventilátory PRUSY MK3, které při tisku příliš ochlazovaly roztavenou strunu na tištěném modelu. Dále byla zvýšena tloušťka vrstvy na 0,2 mm, která výrazně zvýšila rychlost tisku a pevnost modelu. Na obr. 58 je etalon po tisku s odladěnými parametry tisku.



Obr. 58 Vzhled vytištěného etalonu po tisku

Celkově bylo vytištěno 10 etalonů, u kterých se změřily tři hlavní rozměry dle obr. 59 pomocí digitálního posuvného měřidla Mitutoyo digimatic 500-120 (obr. 60). Ty byly změřeny před a po spékání a statisticky vyhodnoceny: aritmetický průměr

(\bar{x}), směrodatná odchylka (s) a chyba měření (CV) dle rovnic (2) až (4). Výsledky jsou uvedeny v tab. 18. Naměřené rozměry jsou k dispozici v příloze č. 5.



Obr. 59 Posuvné měřidlo Mitutoyo digimatic 500-120

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (4)$$

kde:

\bar{x} = aritmetický průměr

s = směrodatná odchylka

CV = chyba měření

n = počet vzorků

x_i = hodnota i teho vzorku

Tab. 18 Výsledky naměřených hodnot smrštění etalonů

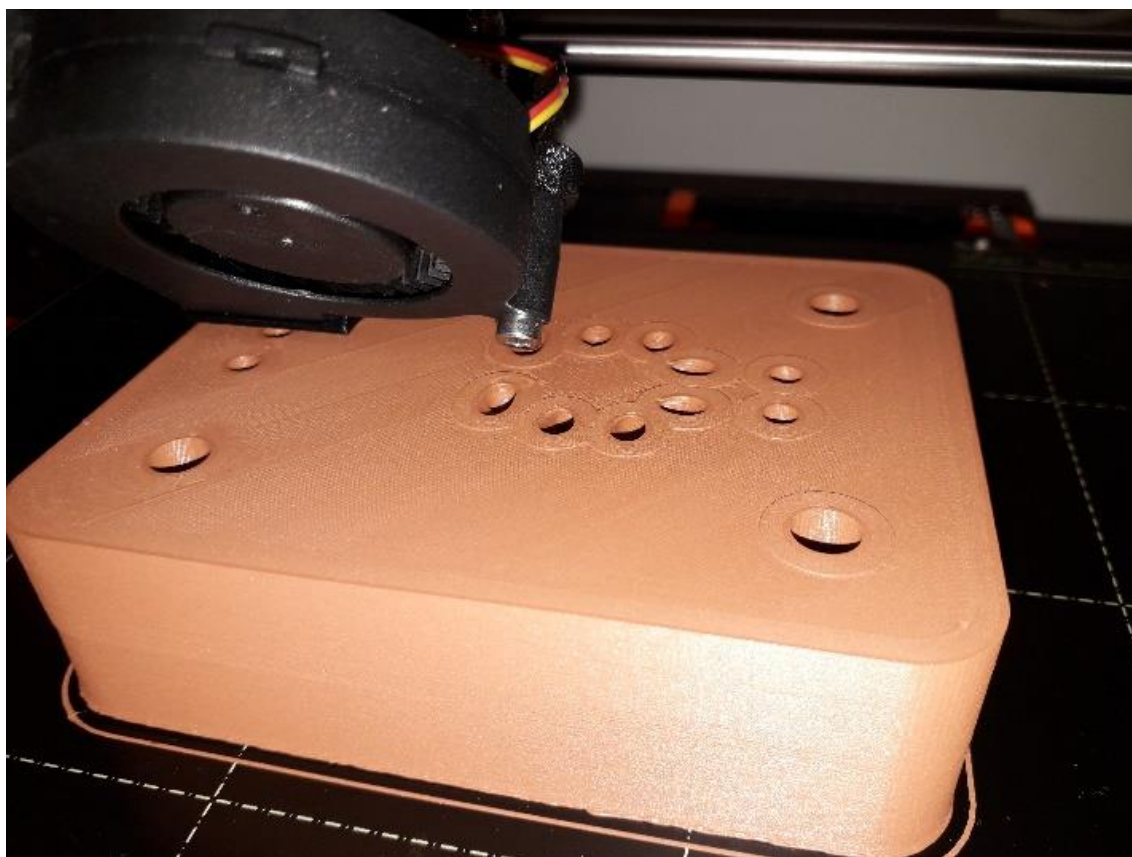
Měřený rozměr		\bar{x}	s	CV [%]
A (20 mm)	Po tisku [mm]	19,99	± 0,03	0,16
	Po spékání [mm]	19,69	± 0,03	0,13
	Změna rozměrů [%]	-1,53	± 0,13	-
B (10 mm)	Po tisku [mm]	9,92	± 0,03	0,30
	Po spékání [mm]	10,04	± 0,03	0,31
	Změna rozměrů [%]	1,15	± 0,09	-
C (10 mm)	Po tisku [mm]	10,00	± 0,03	0,26
	Po spékání [mm]	9,84	± 0,03	0,29
	Změna rozměrů [%]	-1,60	± 0,10	-

Na základě změřených rozměrů na etalonu a následného výpočtu bylo možné určit velikost smrštění vytištěné vložky formy po spékání na 1,53 % v ose X, 1,6 % v ose Y a nárůst rozměrů o 1,15 % v ose Z.

3.7 Tisk a příprava vložky formy na vstřikování (první zkoušení)

Příprava na tisk formy vložky začala zvětšením velikosti modelu vložky formy o změřené parametry etalonu uvedené v kap. 3.6. Po úpravě rozměrů bylo provedeno převedení dat do formátu STL. Nastavení tisku proběhlo za pomoci programu Flicker, parametry tisku byly určeny dle přílohy č. 4.

FDM tisk není ideální volbou pro tisk vodotěsných součástí, jelikož je zde nebezpečí vzniku defektu v podobě přesazené struny nebo špatného spojení vrstev, které by mohly vést k netěsnosti. Proto pro zajištění co největší pevnosti, tuhosti a voděodolnosti byl proveden tisk součásti se 100 % výplní. Dále bylo použito kolem vnějších ploch 15 kontur, protože ty nejvíce zpevnily a utěsnily model. Vzhled dílu při tisku je možné vidět na obr. 60.

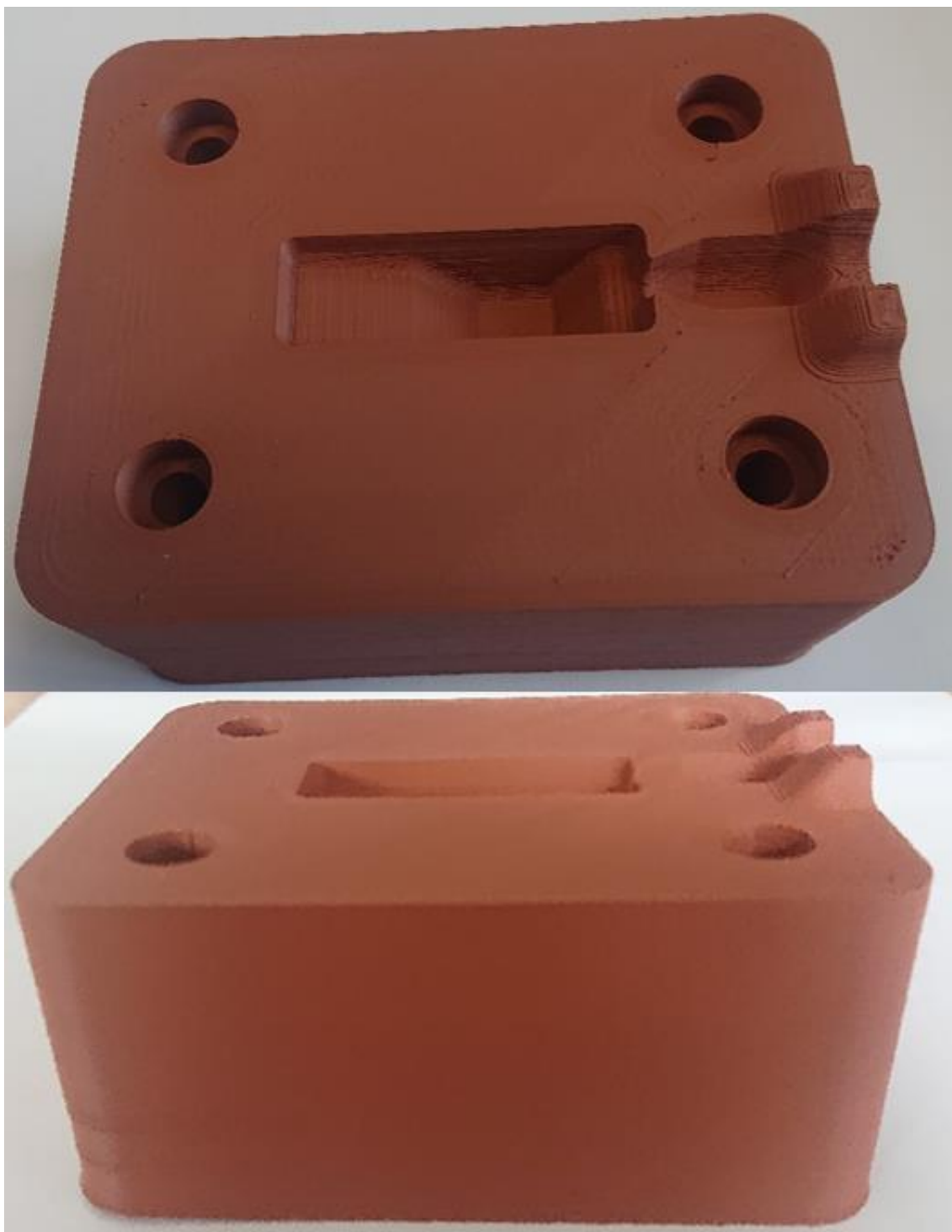


Obr. 60 Průběh tisku tvárnice vložky formy

Doba tisku tvárníku byla 16 h a tvárnice 40 h. Protože materiál byl dodán výrobcem pouze v 500 g baleních (cca 93 m tiskové struny) bylo nutné při tisku vložky formy vyměnit kotouč s tiskovou strunou. Po tisku došlo k výrazným deformacím rohů u tvárníku vložky formy (obr. 61). Tvárnice vložky formy (obr. 62) sice byla také deformovaná, ale pouze minimálně. Deformace tištěné vložky formy byla kombinací několika důvodů: na základní podložce nebylo použito žádné lepidlo a tištěný díl nebyl chlazen z důvodu výrazného odvodu tepla a ochlazování struny. Při pohledu na vytištěný díl je možné vidět velmi kvalitní povrch finální vrstvy dílu, která je až na detaily ve velmi dobrém stavu.



Obr. 61 Vzhled tvárníku vložky formy po tisku



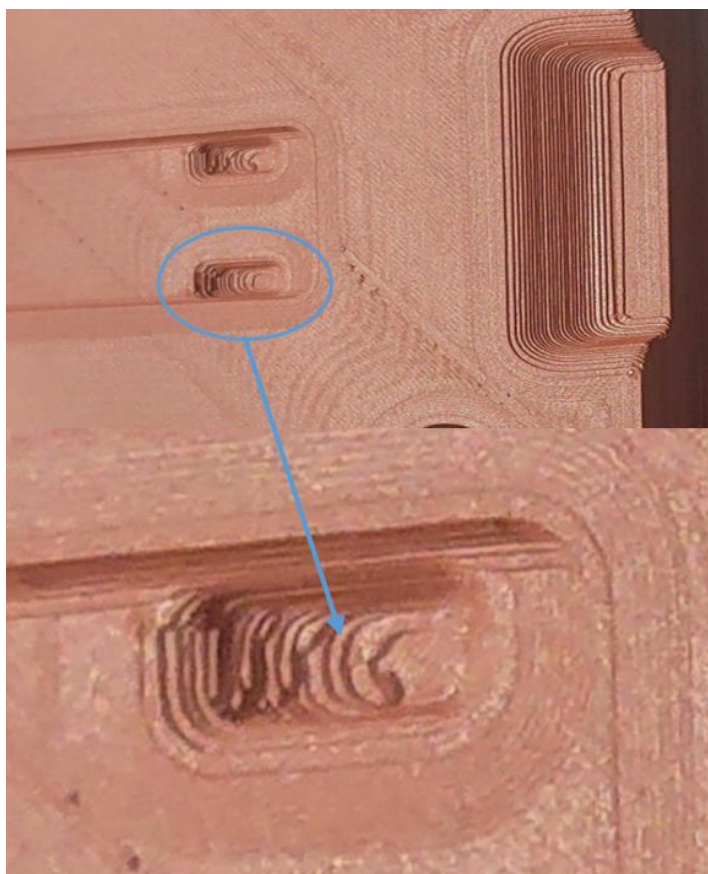
Obr. 62 Vzhled tvárnice vložky formy po tisku

Spékání formy proběhlo v peci při 110 °C po dobu 5 h. V peci proběhl nejenom ohřev a spékání, ale po vypnutí ohřevu i pomalé ochlazování, aby nedošlo k prasknutí vložky formy. Následně byly změřeny rozměry formy po smrštění. Změřením bylo zjištěno, že rozměry formy před a po spékání se nezměnily i přes dříve provedené měření u etalonu. Pravděpodobným důvodem tohoto jevu bylo spékání vložky formy již během tisku, protože trval velmi dlouhou dobu. Vložka

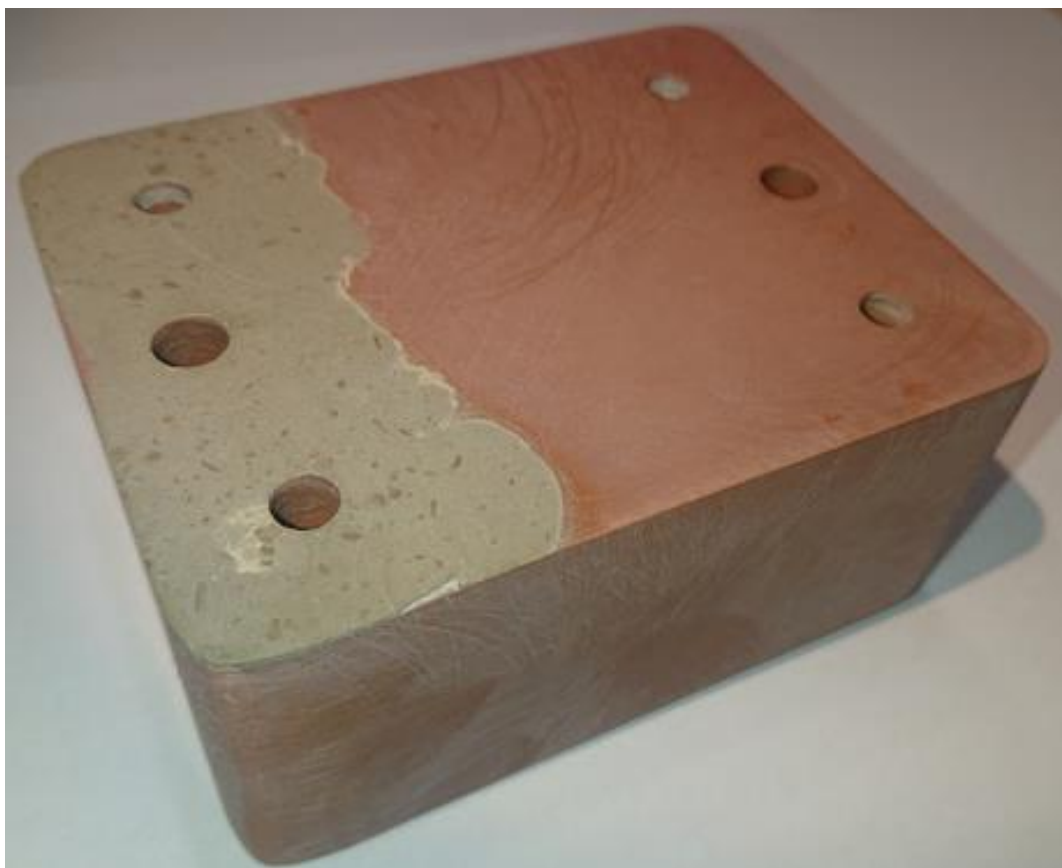
formy nebyla intenzivně chlazená a přijímala teplo z roztavené struny. Proto se musely dodatečně zbrousit vnější plochy na požadované hodnoty. Dále bylo nutné vypodložit vložku formy plechovou podložkou, protože výškový rozměr vložky formy se také nezměnil, a tedy byla vložka formy nižší.

Oprava deformovaných dosedacích ploch byla provedena za pomoci HF titanové tyčinky M8110 175 mm od společnosti HFservis což je speciální rychletvrdnoucí tmel pro použití při opravě forem (parametry jsou uvedeny v příloze č. 6). Oprava začala zdrsněním povrchu formy za pomoci smirkového papíru, na který byl následně nanesen tmel. Vytvrzení tmelu trvalo 2,5 h.

Následně došlo k opracování ploch za pomoci jemného smirkového papíru. Účelem bylo zarovnat dosedací plochy vložky formy a odstranit co nejvíce drobných vad od tisku (obr 63). Došlo ke zbroušení dělicí roviny a „spasování“ tvarového přechodu roviny formy v oblasti vtokové soustavy. Dutina vložky formy nebyla zbroušena kromě odstranění drobných defektů v oblasti kol automobilu. Nakonec byly zbroušeny vnější plochy vložky formy do nominálních rozměrů. Výsledný vzhled tvárníku a tvárnice je možné vidět na obr. 64.



Obr. 63 Detail kvality dutiny vložky formy



Obr. 64 Složená vložka formy po opravě tmelem a zbrúšení

3.8 Vstřikování dílů do vložky formy (první zkoušení)

Začátek vstřikování začal montáží vložky formy do nasazené rámové formy. Rozměry vložky se po spékání nezměnily, a proto bylo nutné kompenzovat výšku vložky za pomoci plechových podložek. Při montáži byl problém s příliš malými zaobleními na bocích vložky formy, které musely být dodatečně zbrúšeny. Poté došlo k zástavbě a ukotvení vložky formy. Nasazená vložka formy je vidět na obr. 65.



Obr. 65 Složená vložka formy po opravě tmelem a zbrúšení

Před začátkem vstřikování byl na zkoušku zapnut temperační okruh o teplotě 40 °C a tlaku 1 bar z důvodu zjištění případných netěsností ve vytištěné vložce formy. Ty se projevily na tvárníku formy, kdy voda začínala prosakovat okolo těsnících kroužků mezi formou a vytištěnou vložkou formy a dále bylo detekováno prosakování vody skrz tvar v oblasti kol automobilu v dutině formy (obr. 66). Při snaze o zajištění většího přitlačení těsnících kroužků byla použita příliš velká utahovací síla a ve vložce formy se v oblasti montáže šroubu vytvořila prasklina (obr. 67).



Obr. 66 Prosakující vody skrz tvárník vložky formy



Obr. 67 Prasklina na tvárníku vložky

Vstřikování probíhalo na zařízení Engel Victory 1800/300 tech (obr 68). Vstřikovaný materiálem byl SABIC PPC 8750U (příloha č. 1). Základní parametry stroje jsou uvedeny v tab. 19.



Obr. 68 Vstřikovací jednotka Engel Victory 1800/300 tech

Tab. 19 Parametry vstřikovacího zařízení

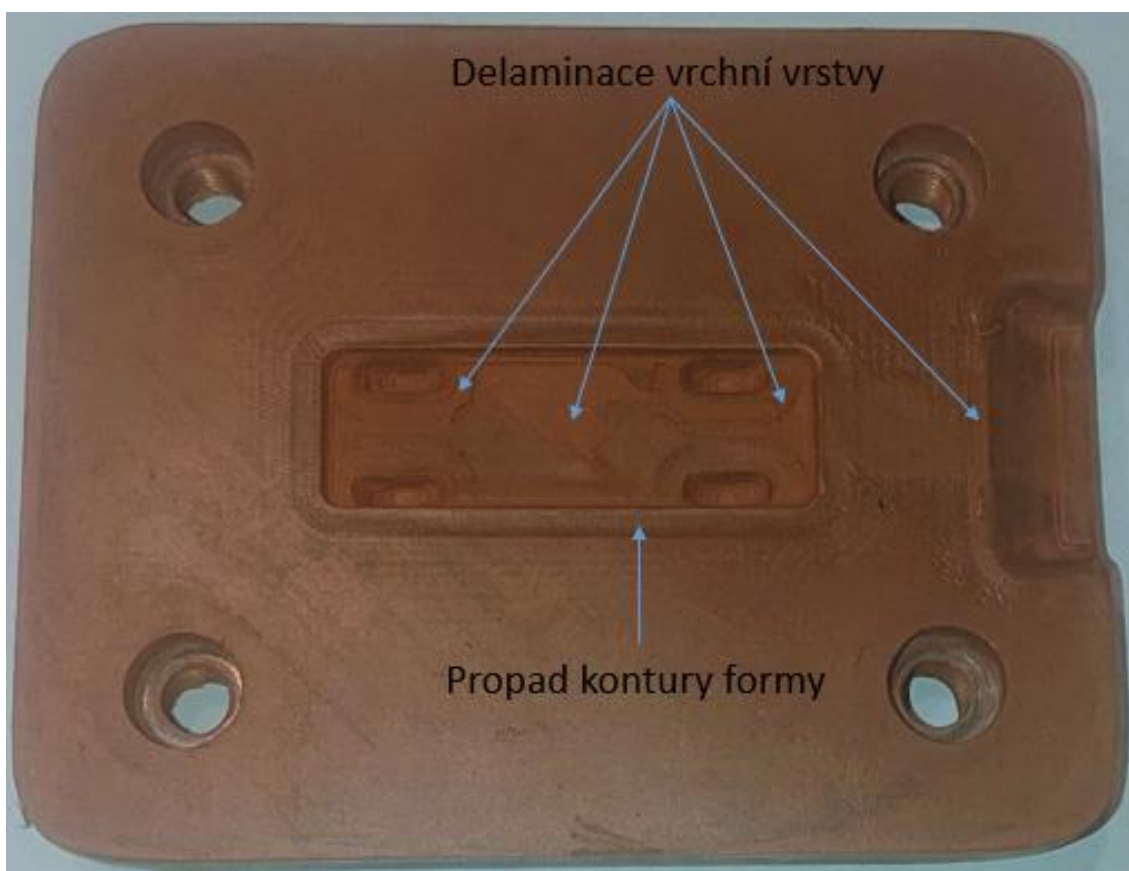
Parametr	Hodnota
Maximální uzavírací síla	3000 kN
Max velikost výstřiku	1039 cm ³
Výška formy	min 350 mm
	max 850 mm
Maximální otevření	1200 mm
Maximální hloubka formy	1050 mm
Maximální šířka formy	750 mm
Maxplochy výstřiku	1000 cm ²
Průměr šneku	70 mm

Vstřikování do dutiny vložky formy probíhalo s parametry dle tab. 20. Veškeré parametry nastavené pro vstřikování lze nalézt v příloze č. 7. Kromě odzkoušení možnosti vstřikovat do plastové vložky formy bylo dalším cílem zjistit, kolik výrobních cyklů vložka vydrží. Díly byly vytahovány ručně za pomoci kleští. Již při 15 vstřikovacím cyklu se začínala delaminace vrchní vrstva vložky formy na tvárníku i tvárnici. Vložka formy byla schopna maximálně vyrobit cca 30 vstřiků. Poté již došlo k výrazné destrukci vrstvy v oblasti „přední kapoty“ automobilu

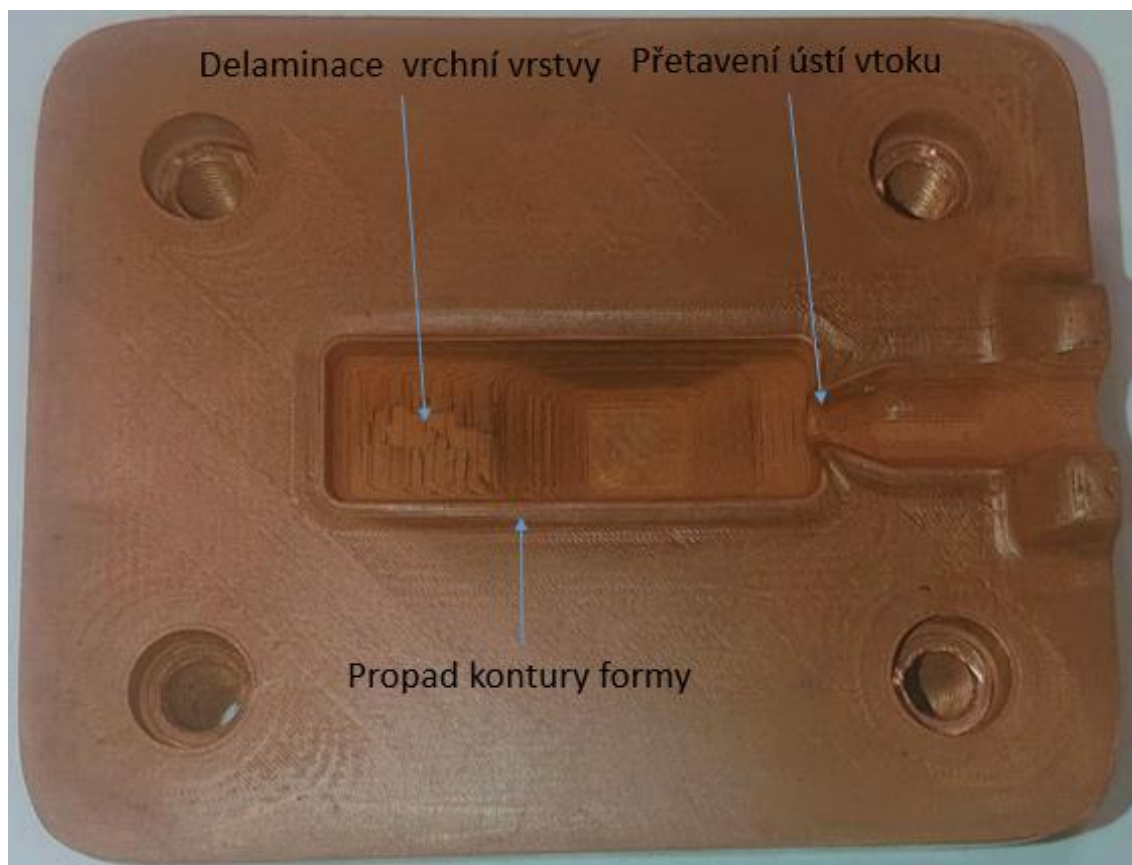
v dutině dílu, kdy vznikla obava, že se vložka zbortila. Při podrobnějším zkoumání dutiny vložky formy se tato obava nepotvrdila. Delaminované vrstvy by bylo možné odstranit skalpelem a pokračovat dál se vstřikováním. Vzhled a kvalita tvárníku vložky po vstřikování 25 kusů výrobků lze vidět na obr. 69 a tvárnice na obr. 70.

Tab. 20 Parametry nastavení vstřikování

Parametr	Hodnota
Vstřikovací tlak	1,4 MPa
Doba vstřikování	0,37 s
Rychlost vstřikování	35 mm/s
Velikost dotlaku	2,38 MPa
Doba dotlaku	2 s
Doba chlazení	120 s
Teplota vstřikované taveniny	220 °C
Teplota temperačního média	40 °C

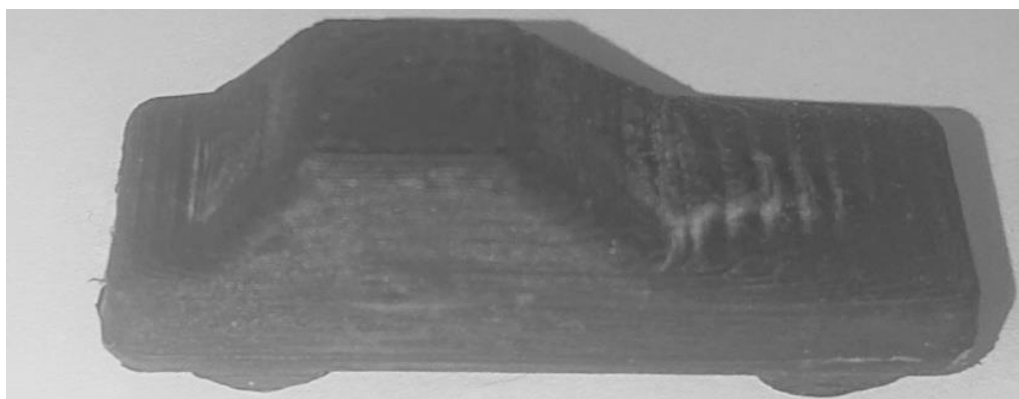


Obr. 69 Vzhled tvárníku a tvárnice vložky formy po vstřikování

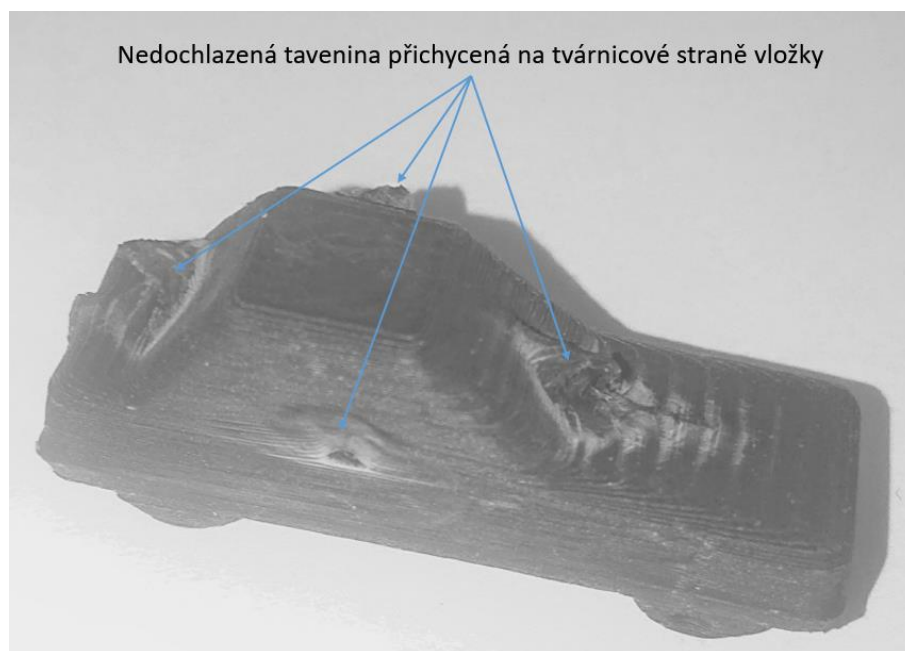


Obr. 70 Vzhled tvárníku a tvárnice vložky formy po vstřikování

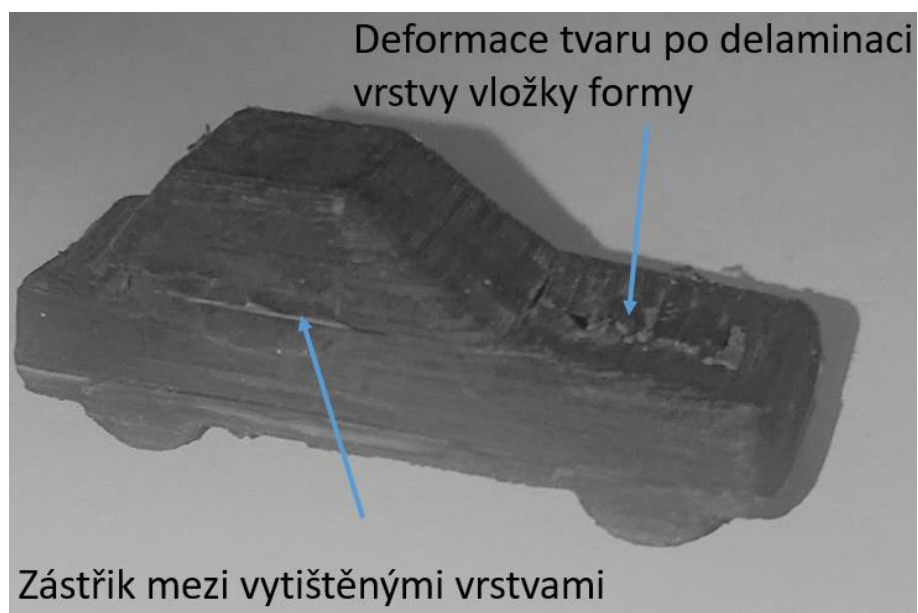
Vstřikovaný díl tvaru automobilu (obr. 71) měl po procesu vstřikování velmi výrazné propadliny a staženiny. V oblastech největšího objemu plastu byl většinou povrch dílu poškozen (delaminace) a část plochy dílu zůstala v dutině vložky formy (obr. 72). S největší pravděpodobností to bylo způsobeno tím, že vnitřní část dílu nebyla dostatečně ztuhlá, což je dáno teplotními a tepelnými vlastnostmi plastové vložky, dále dutina formy po tisku měla hrubý povrch a pro prvních 18 vstřikování nebyl použit separátor. Po použití separátoru se stav vstřikovaných dílů zlepšil (obr. 73). Ale i přes nízký vstřikovací tlak a dotlak prakticky veškeré díly obsahovaly přetoky v dělicí rovině (obr. 74).



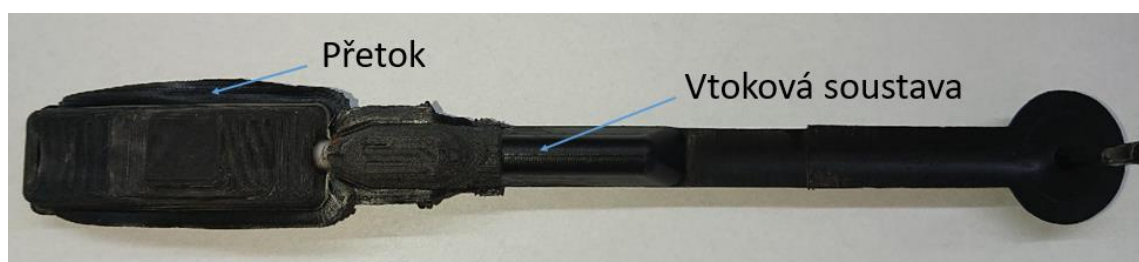
Obr. 71 Díl č. 1 bez použití separátoru



Obr. 72 Díl č. 5 bez použití separátoru



Obr. 73 Díl č. 25 s použitím separátoru



Obr. 74 Díl s přetokem

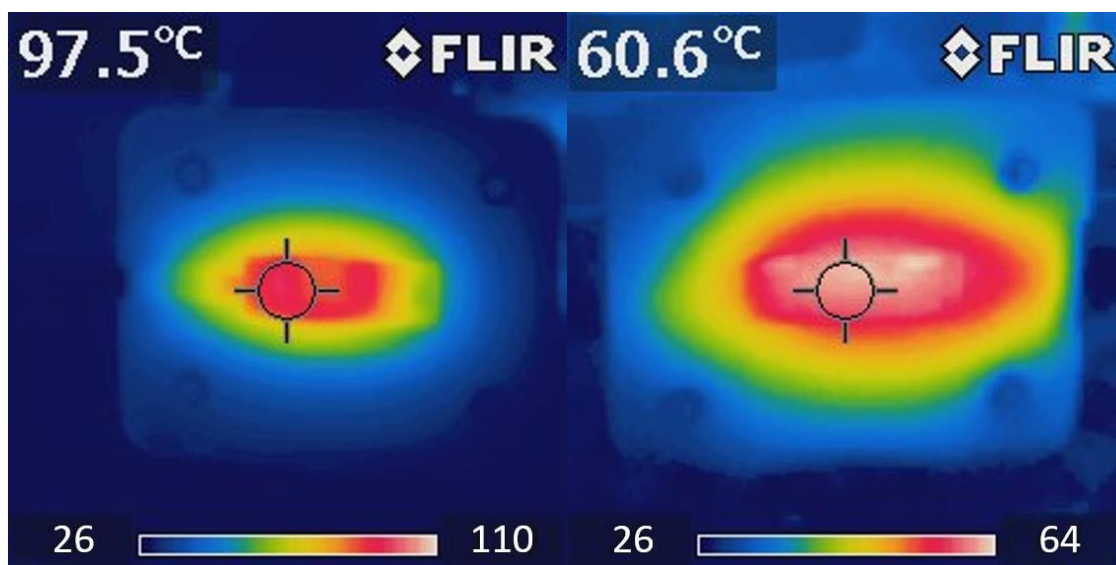
3.9 Měření termokamerou (první zkoušení)

Měření povrchové teploty vložky formy a dílu probíhalo ruční termokamerou FLIR i5 (obr. 75). Jedná se o jednoduché zařízení pracující na principu snímání vyzařovaného infračerveného světla měřených objektů. Protože každý materiál jinak odráží teplo, je nutné správně nastavit emisivitu (ϵ). V případě termokamery bylo možné nastavit daný parametr o čtyřech velikostech. Z tabulky známých hodnot emisivity byl měřen povrch vyjmutého plastového dílu při $\epsilon = 0,95$. Tvárník a tvárnice vložky byly měřeny při $\epsilon = 0,65$.

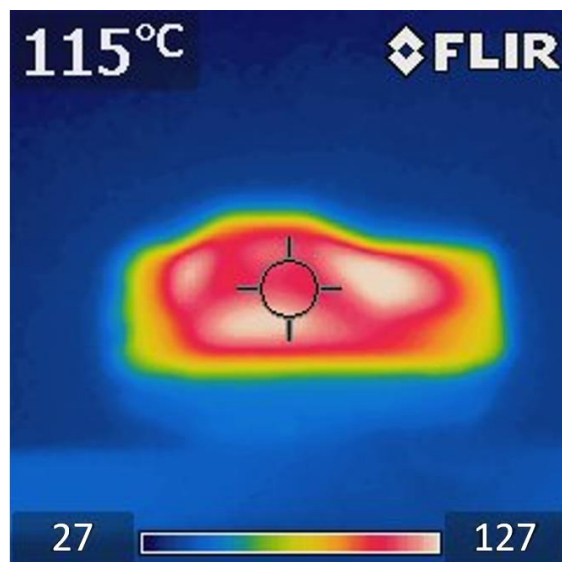
Měření tvárníku a tvárnice proběhlo 15 s po vyjmutí dílu. Naměřená maximální teplota byla 110 °C v dutině tvárnice a 60 °C v dutině tvárníku (obr. 76) a 115 °C na vstřikovaném dílu (obr. 77). Na obrázku z měření lze vidět výrazný rozdíl teplot vložky formy v oblasti přídě automobilu (přechází ze žluté do zelené barvy) vůči oblasti „kokpitu“, která má největší objem taveniny a vykazovala také nejvyšší naměřené teploty. Při měření bylo možné pozorovat chladnutí dutiny tvárnice přibližně 0,78 °C/s.



Obr. 75 Termokamera FLIR i5



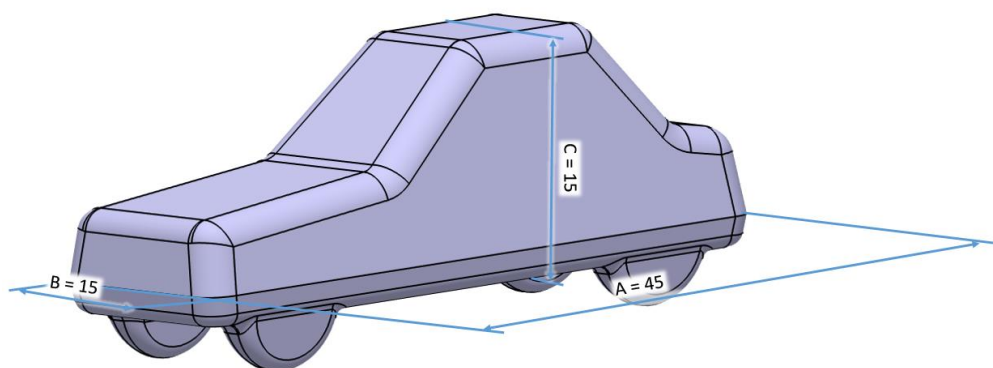
Obr. 76 Teplota tvárnice a tvárníku



Obr. 77 Teplota vstříkovaného dílu po vyjmutí z formy

3.10 Naměřené hodnoty rozměrů dílu (první zkoušení)

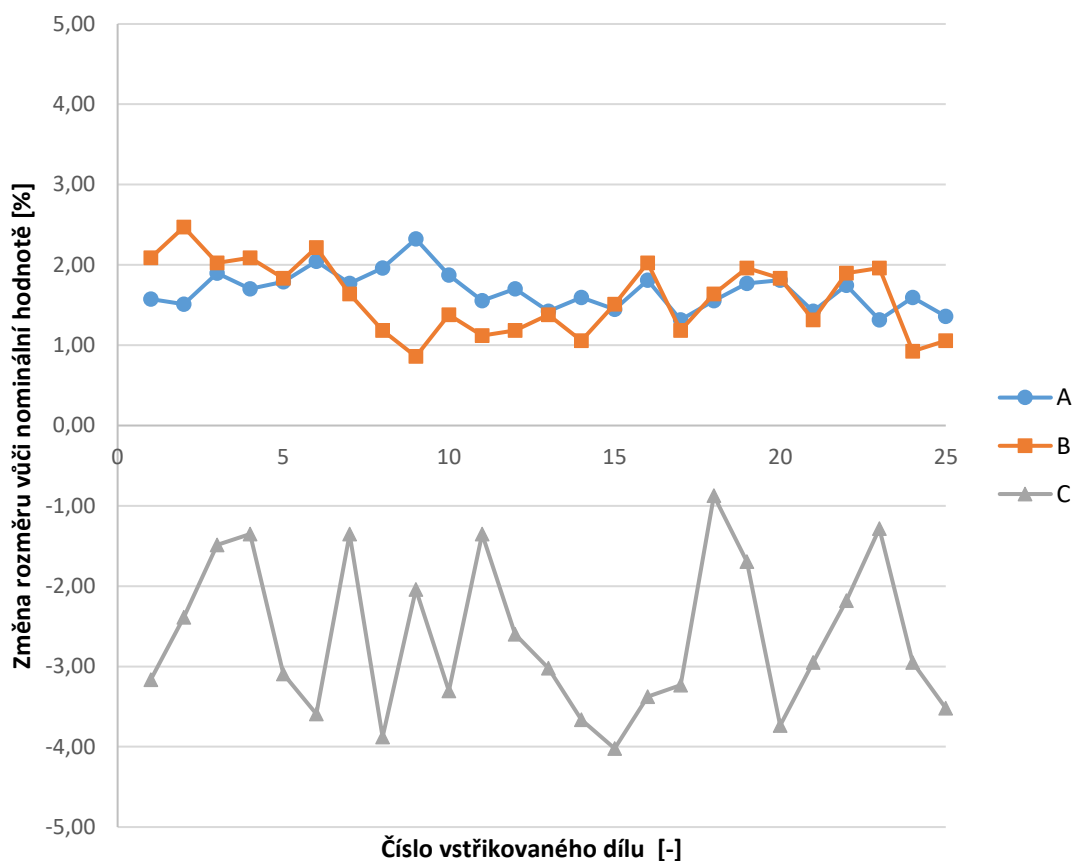
Rozměry součásti byly měřeny 24 h po vstříkování a naměřené hodnoty byly zaznamenány do tab. 21. Měření probíhalo za pomoci posuvného měřidla Mitutoyo digimatic 500-120. Výsledky naměřených rozměrů dílu se dle obr. 79 oproti nominálním hodnotám pohybovaly v průměru o 1,67 % v ose X a 1,59 % v Y větší, než by měly být. To odpovídá rozměrům dílu zvětšeného o velikost spékání viz kap. 3.6. Zajímavější výsledek byl v ose Z. Zde byl očekáván rozměr o 1 % menší, ale dle měření byl rozměr průměrně o 2,64 % menší (naměřené hodnoty byly větší od 1 % do 4 %). Důvodem této nepřesnosti byl nízký dotlak a nepřesná výška formy.



Obr. 78 Měřené rozměry vstříkovaného dílu

Tab. 21 Výsledky naměřených hodnot smrštění po 24 h (první zkoušení)

	Měřený rozměr					
	A [mm]	Změna rozměru A [%]	B [mm]	Změna rozměru B [%]	C [mm]	Změna rozměru C [%]
\bar{x}	45,77	1,67	15,24	1,59	14,61	-2,64
s	± 0,11	± 0,24	± 0,07	± 0,45	± 0,13	± 0,94
CV [%]	0,24	-	0,45	-	0,92	-

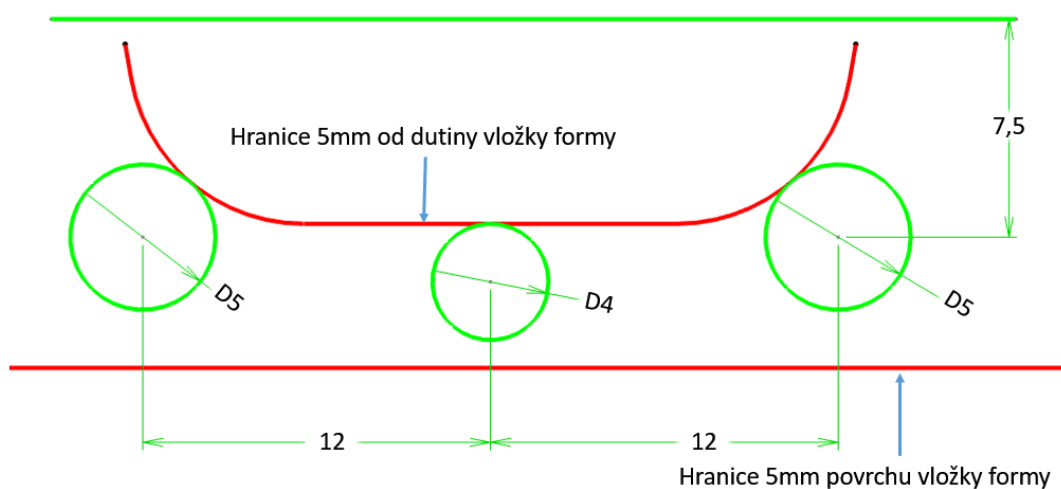


Obr. 79 Změny rozměru vstřikovaného dílu oproti nominálním hodnotám (první zkoušení)

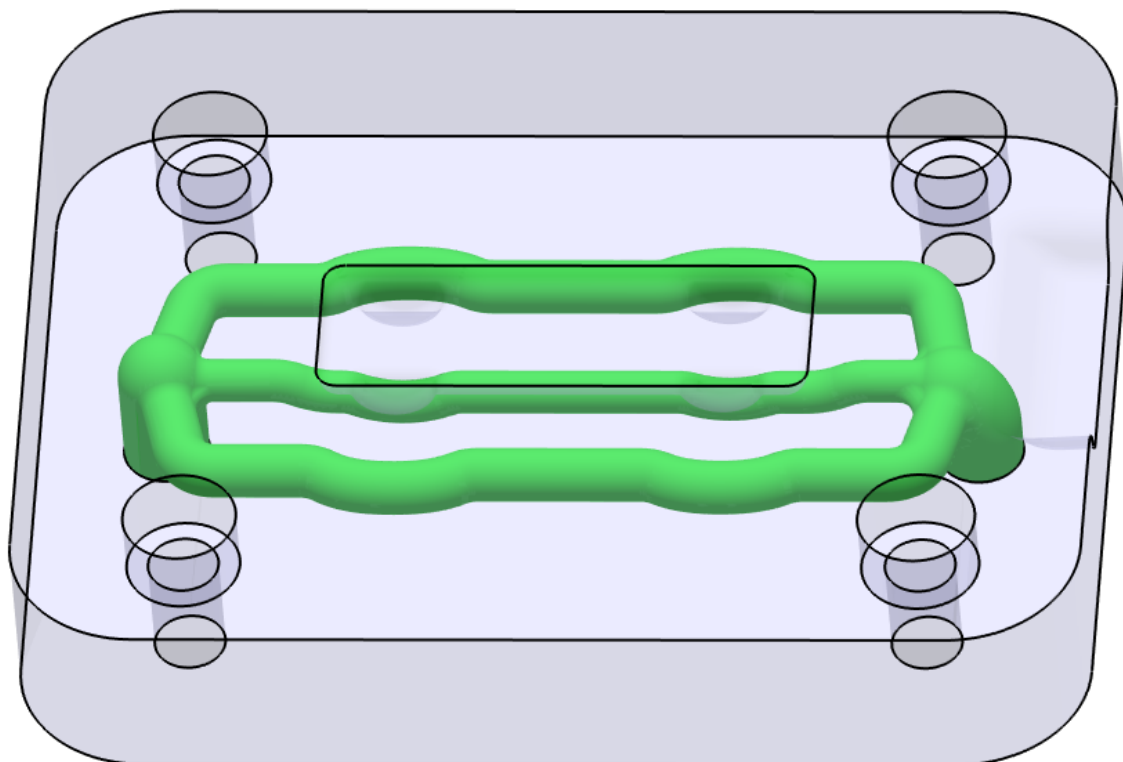
3.11 Konstrukční úpravy, tisk a příprava vložky formy (druhé zkoušení)

Výsledky z prvního zkoušení a měření nebyly uspokojivé. Především prosakování temperační kapaliny přes tvárníkovou část vložky formy bylo velkým problémem. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl opakovat celou zkoušku, kdy se vložka formy upravila dle poznatků z prvního zkoušení. Pro druhou vložku bylo upraveno zaoblení boků z r 9 na r 12, aby odpadla nutnost tuto oblast brousit při vsazování do formy.

Prosakování vody temperačním kanálem do dutiny vložky formy tvárníku bylo pravděpodobně zapříčiněno 4 mm odstupem od dutiny formy v oblasti pneumatik, což se eliminovalo zvětšením na 5 mm. Při této tloušťce nedocházelo u tvárnice vložky z prvního měření k prosakování vody. Toto zvětšení znamenalo přepracovat temperační rozvod, kdy z důvodu nedostatečného konstrukčního prostoru bylo nutné redukovat počet temperačních kanálů na tři (obr. 80). Pro zajištění stejného průtoku byly průměry krajních kanálů zvětšeny na 5 mm. Výsledná konstrukce nového rozvodu temperačních kanálů je vidět na obr. 81.

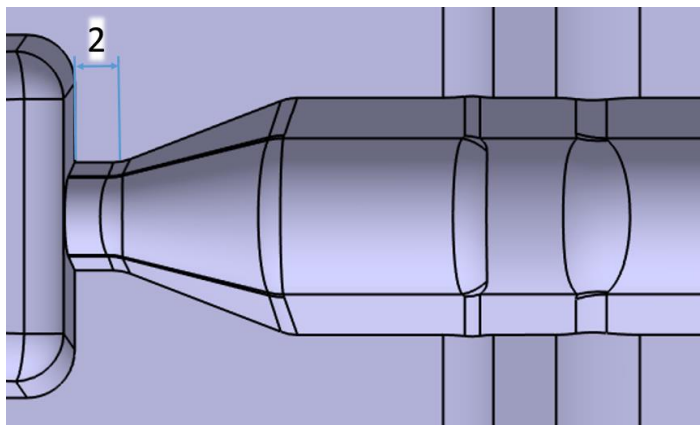


Obr. 80 Skica rozvržení temperačních kanálů tvárníku s 5 mm kanály



Obr. 81 Vzhled temperačního rozvodu tvárníku s 5 mm kanály

Na tvárnici bylo upraveno ústí vtokového kanálu, kdy byl přidán 2 mm zúžený úsek, aby při vstřikování nedocházelo k deformování této oblasti (obr. 82).



Obr. 82 Konstrukční úprava ústí vtoku

Parametry pro tisk zůstaly stejné, jako parametry uvedeny v příloze č. 4. Tisk vložky formy proběhl bez navýšení rozměrů o smrštění, které se při spékání první vložky formy neprojevovalo. Dále bylo počítáno s deformací spodní části formy, a tak byla každá strana vložky formy navýšena o 2 mm. Toto navýšení slouží pro kompenzování deformací dosedací plochy a následné zfrézování do nominální výšky. Rozměry vložky formy po tisku byly 99,98x80,14x66,02 mm. Po spékání se zmenšily v ose X a Y o 0,5 % a narostly v ose Z o 0,5 %. To byl poměrně překvapivý výsledek, který se rozcházel s výsledkem po spékání první vložky formy. Lze tedy konstatovat, že vliv spékání formy není stabilní z hlediska velikosti a pohybuje se v rozmezí 0 % až 0,5 %.

Kvůli předešlému problému s přichytáváním taveniny na ploše dílu ke stěnám dutiny byl proveden pokus vyleštit plochy dutiny dílu vložky formy do hladka. Leštění probíhalo za pomoci Bosch Dremel 4000 (obr. 83) a leštícího nástavce.



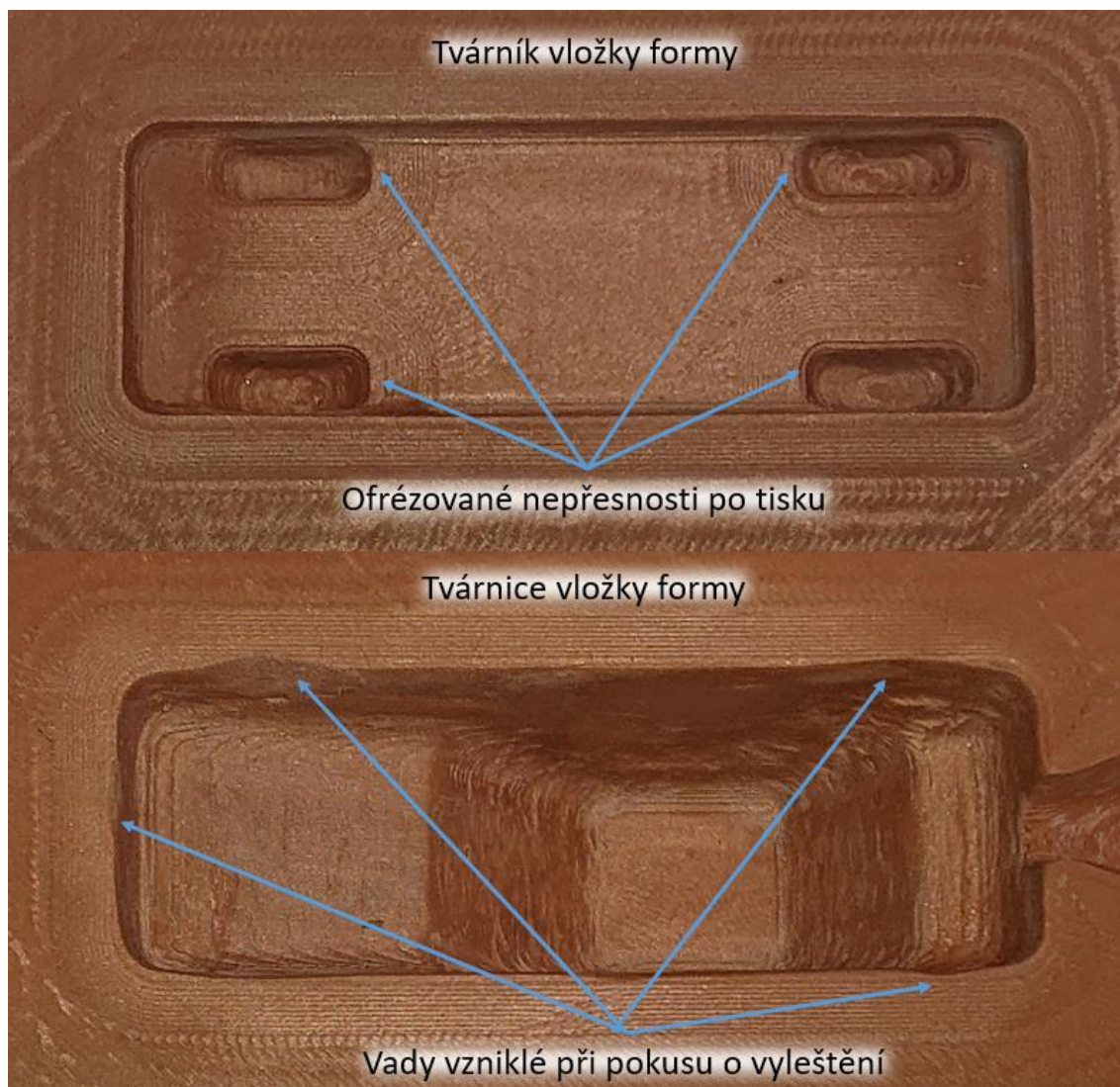
Obr. 83 Bosch Dremel 4000

Během leštění se ukázalo, jak je tento materiál velmi obtížně lešitelný. Při pokusu o vyleštění bočních stěn na tvárnici vložky formy došlo k vytvoření několika výraznějších defektů v podobě odtavení části stěny dutiny dílu

vložky formy. Následně byla použita drobná fréza (obr. 84), se kterou byly odfrézovány defekty vzniklé tiskem, a současně zbrousit povrch tak, aby nebyly vidět vrstvy po tisku na šikmých plochách dutiny vložky formy. Následně byl povrch dobroušen jemným smirkovým papírem. Výsledný vzhled dutin tvárníku a tvárnice je ukázán na obr. 85. Proto při budoucí výrobě forem z plastu pomocí 3D tiku doporučuji pouze ofrézovat vady po tisku drobnou frézou a jemně přebrousit smirkovým papírem. Rozhodně nedoporučuji leštit plochy dutiny pro vytvoření jednolitého povrchu.



Obr. 84 Fréza použitá pro zbroušení povrchu formy



Obr. 85 Vzhled dutiny vložky formy po opracování (druhé zkoušení)

3.12. Vstřikování dílu do vložky formy (druhé zkoušení)

Nastavení vstřikovacích parametrů vycházelo z prvního měření. V tab. 22 jsou uvedeny upravené parametry vstřikování pro druhé zkoušení a druhou vytištěnou vložku formy.

Tab. 22 Parametry nastavení vstřikování (druhé zkoušení)

Parametr	Hodnota
Vstřikovací tlak	1,4 MPa
Doba vstřikování	0,37 s
Rychlost vstřikování	35 mm/s
Velikost dotlaku	3,96 MPa
Doba dotlaku	4 s
Doba chlazení	150 s
Teplota vstřikované taveniny	220 °C
Teplota temperačního média	40 °C

Pro eliminaci přichycení nedostatečně ztuhlé povrchové vrstvy dílu ke stěném dutiny vložky formy byla doba chlazení prodloužena na 150 s. Separátor byl použit od již prvního vstřiku. Po zapojení temperačního okruhu začal protékat tvárník vložky formy v oblasti „kol“ automobilu (obr. 86.), a to i přes navýšenou tloušťku stěny mezi temperačním kanálem a dutinou ze 4 na 5 mm. Proto i při tomto zkoušení musel být přívod temperační kapaliny do této části vložky formy vypnut. Toto zjištění je velmi nepříjemné, jelikož to ukazuje náročnost a složitost tvorby vodotěsného tisku metodou FDM pro tvarově složitější oblasti a díly.

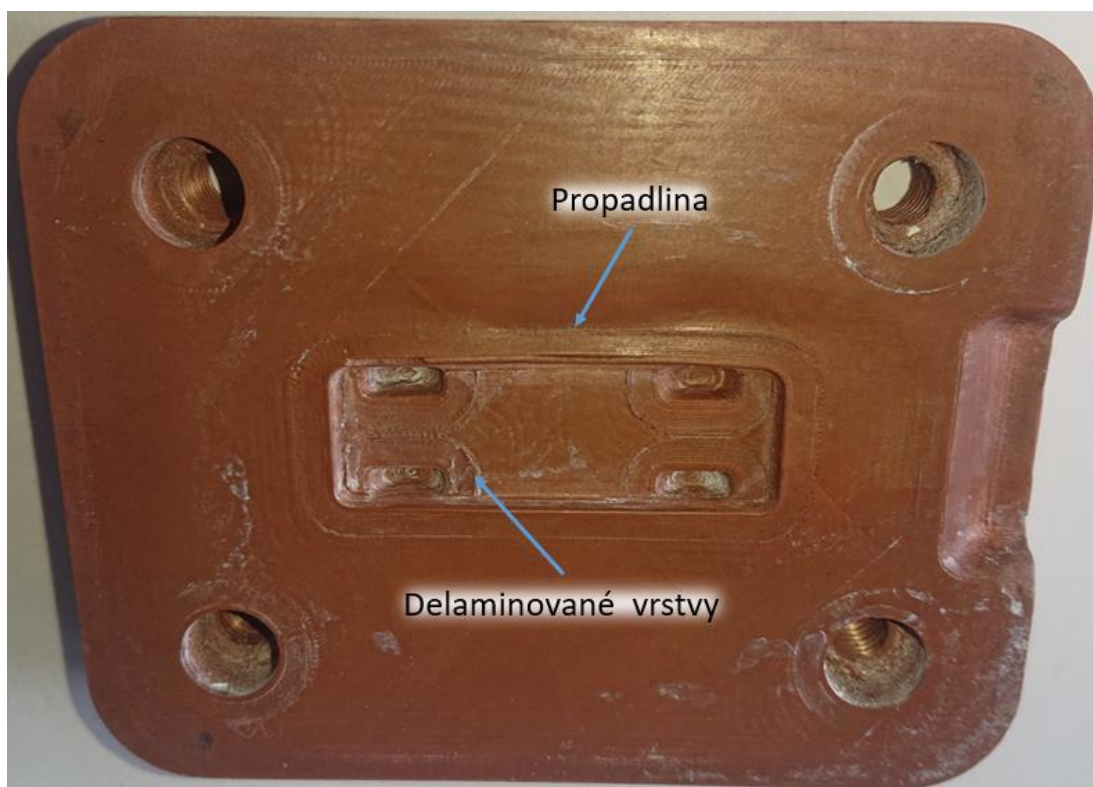


Obr. 86 Vztlínání vody skrz tvar vložky formy tvárníku (druhé zkoušení)

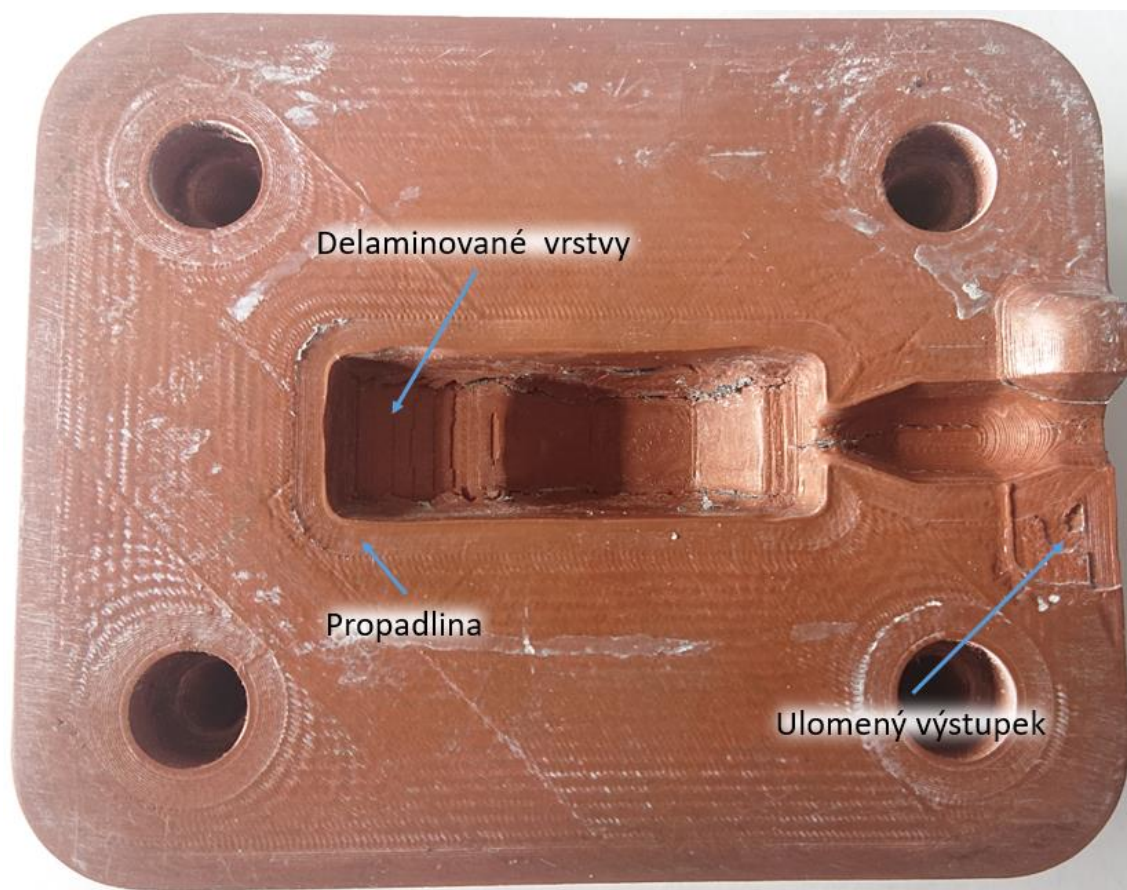
Oproti minulému zkoušení proběhl pokus o eliminaci staženin, propadlin a nedostříknutých oblastí vstřikovaného dílu navýšením velikosti dotlaku z 23,8 na 39,6 bar a zvýšení doby dotlaku ze 2 na 4 s. Výsledkem byl „plnější“ díl, než u

zkoušení, ale výsledek stále vykazoval výše uvedené vady. Další navýšení hodnoty nebo času dotlaku již nebylo možné, protože docházelo k extrémnímu snížení životnosti vložky formy. Již při třetím vstřikovacím cyklu odpadl výstupek formy v oblasti vtoku. Při vstřikování díky použití separátoru a delší době chlazení sice nedocházelo k „přitavení“ nezatuhnuté vrstvy plastu ke stěně dutiny vložky formy, ale postupně docházelo k tvorbě trhlin mezi vrstvami vložky. V dělicí rovině také docházelo k vytlačování plochy formy přetokem z důvodu vyššího dotlaku. Již při 15 vstřikovacím cyklu došlo k destrukci formy, kdy se protrhla stěna mezi chladícím kanálem a dutinou formy. Z těchto 15 vstřikovacích cyklů bylo pouze 8 kompletně vystříknutých dílů z nich byl poslední vstřikovaný díl vyloučen, protože se při jeho tvorbě protrhla stěna dutiny vložky formy. Zbylé vstřikovací cykly byly použity pro nastavení vstřikování.

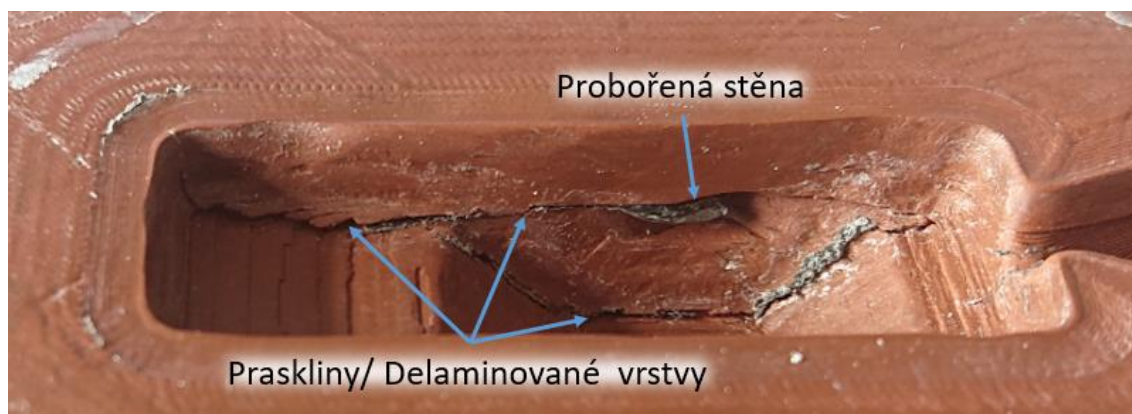
Vzhled tvárníku vložky po vstřikování lze vidět na obr. 87 a tvárnice na obr. 88. Na tvárníku je možné pozorovat trhliny ve spodní části dutiny vložky formy a delaminované kraje formy. Dále vznikla rozměrná propadlina způsobená tlakem přetoku při dotlaku. Tvárnice vložky skončila v ještě horším stavu, v dutině formy lze vidět probořenou stěnu vložky (obr. 89). Na většině svislých stěn jsou patrné trhliny (delaminace vrstev). Oblast přední kapoty se kompletně delaminovala.



Obr. 87 Vzhled tvárníku vložky formy po vstřikování (druhé zkoušení)

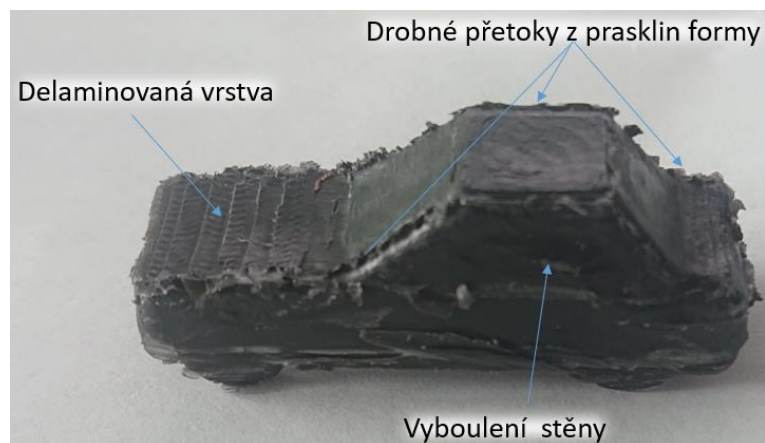


Obr. 88 Vzhled tvárnice vložky formy po vstřikování (druhé zkoušení)

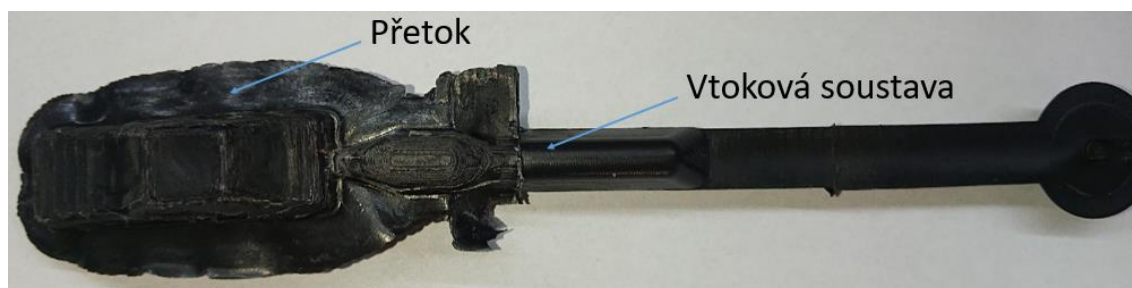


Obr. 89 Probořená stěna vložky formy tvárnice (druhé zkoušení)

Naopak vzhled dílů po vstřikování (obr. 90) měl oproti předešlému zkoušení výrazně menší staženiny. Rozměr vstřikovaného dílu se již velmi blížil ve všech měřených rozměrech nominálním hodnotám. Po použití separátoru, vyleštění ploch a delším času chlazení byl vstřikovaný díl automobilu vyjmut z dutiny vložky formy bez přichycení neztuhlých oblastí ke stěnám dutiny. Na druhou stranu byla kvalita povrchu dílu mnohem horší, než u prvního zkoušení. Větší dotlak vytvářel zástřík o tloušťce přibližně 0,7 mm (obr. 91).



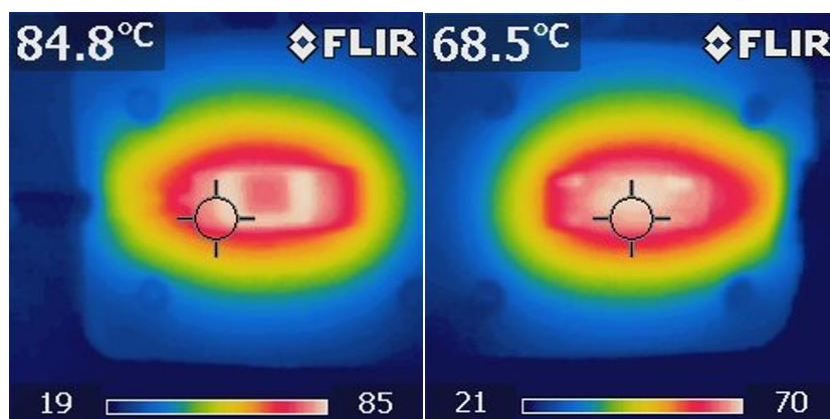
Obr. 90 Vstřikovaný díl č.7 (druhé zkoušení)



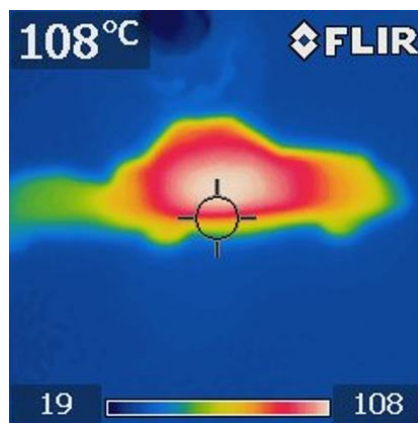
Obr. 91 Díl s přetokem (druhé zkoušení)

3.13 Měření termokamerou (druhé zkoušení)

Měření termokamerou ukázalo, že zvýšení doby chlazení snížilo teplotu formy oproti prvnímu měření na tvárnici o 13 °C a zvýšilo o 8 °C na tvárníku (obr. 92), který však nebyl chlazen. Teplota dílu (obr. 93) byla po vyjmutí z formy chladnější o 19 °C oproti prvnímu zkoušení. To přibližně odpovídá již dříve zjištěnému poklesu teploty vložky formy o 0,78 °C/s.



Obr. 92 Teplota tvárnice a tvárníku (druhé zkoušení)



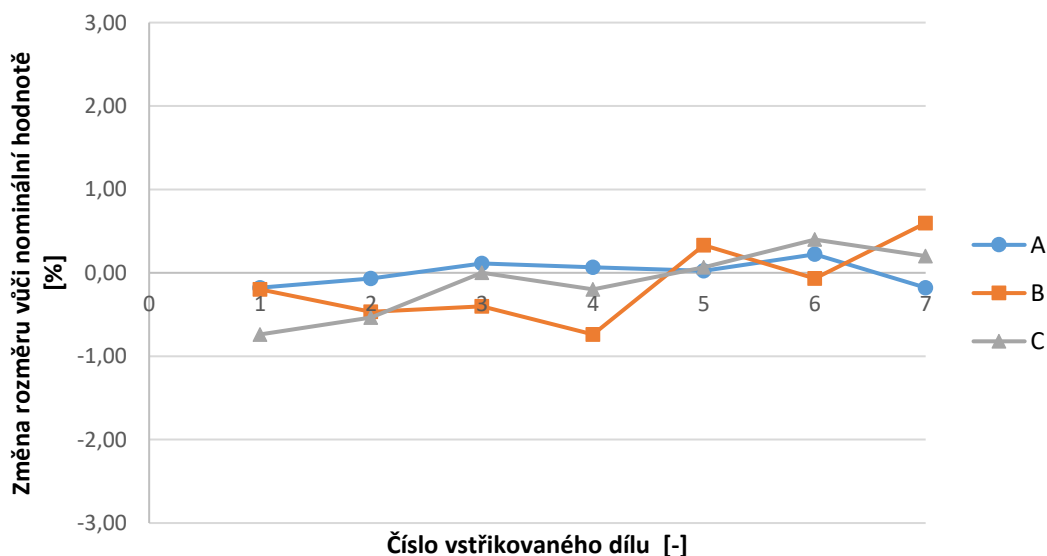
Obr. 93 Teplota vstřikovaného dílu po vyjmutí z formy (druhé zkoušení)

3.14 Naměřené hodnoty dílu (druhé zkoušení)

I u druhého zkoušení proběhlo měření vstřikovaného dílu za pomoci digitálního posuvného měřidla. Z tab. 23 a obr. 94 lze pozorovat postupný nárůst veškerých měřených rozměrů dílu, což je způsobeno stlačováním vrstev plastové vložky, tedy zvětšováním objemu a rozměrů dutiny vložky formy.

Tab. 23 Výsledky naměřených hodnot smrštění po 24 h (druhé zkoušení)

	Rozměr					
	A [mm]	Změna rozměru A [%]	B [mm]	Změna rozměru B [%]	C [mm]	Změna rozměru C [%]
\tilde{x}	45,00	0,00	14,98	-0,14	14,98	-0,12
s	0,06	0,14	0,06	0,43	0,06	0,37
CV [%]	0,14	-	0,43	-	0,37	-



Obr. 94 Změny rozměru vstřikovaného dílu oproti nominálním hodnotám (druhé zkoušení)

4. Shrnutí výsledků měření

Cílem této diplomové práce bylo zjistit použitelnost vložky formy obsahující temperační kanály vytištěné aditivní technologií FDM. Nejprve byl vybrán pro materiál vložky formy Proto-pasta Cooper kompozitní materiál HTPLA s 60 % Cu, který je výrobcem dodáván v kotoučích tiskové struny o průměru 1,75 mm. Vlastnosti materiálu měly zaručovat poměrně vysokou teplotní odolnost po spékání o velikosti okolo 150 °C. Vysoký obsah mědi měl zaručit vyšší tepelnou vodivost, než mají čisté plasty. Pro materiál dílu byl použit Kopolymer PP a EPDM s 15 % plnivem v talku.

Vstřikovaný díl byl konstruován s velkými změnami objemu, aby bylo snadné zjistit schopnost odvodu tepla. Konstrukce vložky formy obsahovala temperační kanály o průměru 4 mm přesně kopírující tvar dutiny dílu ve vzdálenosti 5 mm. Pro ověření udávaného smrštění výtisku po spékání dle výrobce, byly vytištěny zkušební etalony, na kterých bylo změřeno smrštění 1,53 % v ose X, 1,6 % v ose Y a nárůst rozměrů o 1,15 % v ose Z. Parametry tisku bylo nutné odladit na etalonu, kvůli problému s velmi nízkou adhezí vrstev. Tisk vložky formy proběhl při tavení struny na 240 °C při vypnutých ventilátorech, 15 kontur a 100% plnění. Tvárnice se tiskla 40 h a tvárník 16 h. To je poměrně vysoký čas tisku, protože jsou rozměry vložky formy pouze 100x80x62 mm.

Po tisku a spékání se vložka formy zdeformovala, ale její rozměry se nezměnily. Zdeformované plochy vložky formy byly opraveny tmelem. Boční plochy vložky formy byly zbroušeny na nominální rozměry. Nižší výška vložky musela být kompenzována plechy. Při prvním zkoušení prosakoval temperační okruh tvárníku. Domněnka byla, že to bylo z důvodu lokálního přiblížení kanálu k dutině formy z 5 na 4 mm. Vstřikování probíhalo za teploty 220 °C, nízkého dotlaku o velikosti 2,36 MPa a doby chlazení 120 s. Prvních 18 vstřikovacích cyklů proběhlo bez separátoru, což způsobilo přichycení části nezatuhlé vrstvy plastu v tvárnici vložky. Po jeho použití byl tento problém z velké části vyřešen. Zkouška byla přerušena po 30 vstřikovacích cyklech z důvodu delaminace vrstvy v oblasti „přední kapoty“ vstřikovaného dílu v podobě automobilu. Z měření rozměrů vstřikovaných dílů bylo zjištěno, že se rozměry rozcházel o hodnoty spékání formy. Rozměr výšky automobilu byl nestabilní, protože bylo nutné plechy vypodložit vložku formy.

Kvůli neuspokojivým výsledkům prvního měření byl proveden druhý tisk vložky formy. Na tvárníku byl upraven chladicí kanál tak, aby byl 5 mm od dutiny formy. Tisk byl proveden bez zvětšení o spékání, ale s přídávkem 2 mm výšky na tvárníku a tvárnici vložky pro kompenzaci deformace tvaru. Po spékání vložky formy byly naměřeny změny rozměrů o 0,5 %. Z toho lze vyvodit, že spékání materiálu je poměrně nestabilní. Po spékání se také trochu zdeformoval spodek vložky, což bylo vyřešeno zfrézováním přídávku na nominální rozměry formy. Vyleštění dutiny vložky formy bylo velmi náročné, kdy při použití Dremelu a leštícího kotouče vznikla vada odtavením části dutiny tvárnice. Při zkoušení těsnosti vložky formy bylo zjištěno prosakování temperační kapaliny v dutině tvárníku i přes navýšení vzdálenosti mezi temperačním kanálem a dutinou vložky formy.

Druhé zkoušení vstřikování vložky formy bylo s dobou chlazení 150 s a za použití separátoru. Dále pro eliminaci staženin byl navýšen dotlak na hodnotu 3,96 MPa po dobu 4 s. To se ukázalo být fatálním pro životnost formy, která vydržela pouhých 15 vstřikovacích cyklů, z čehož bylo pouze 7 kompletních dílů (zbytek byl na odladění). Tyto parametry sice částečně odstranily vady na díle, ale výsledné zlepšení nebylo tak výrazné, jak se předpokládalo. Při posledním vstřikovacím cyklu došlo k proboření stěny tvárnice mezi dutinou formy a temperačním kanálem. Vložka formy byla také poškozena výraznými prasklinami v dutině dílu, delaminace vrstev a otlaku ploch v oblasti dělicí roviny. Většinu daného poškození způsobila nízká adheze vrstev, ta je u FDM tisku vždy o velmi nízké pevnosti, kdy použitý materiál se vyznačoval ještě nižší pevností. Otláčení tvaru bylo způsobeno kombinací měknutí materiálu za vyšší teploty a vysokého dotlaku. Vyšší dotlak vytvořil rozměrově mnohem přesnější vstřikované díly, přesto jejich celkový vzhled byl mnohem horší než u prvního zkoušení. Dle grafu 2 bylo možné sledovat postupné navyšování rozměrů dílu zapříčiněné vysokým dotlakem, který na dílu vytvářel velké přetoky o tloušťce 1 mm.

5. Závěr práce

Tato diplomová práce byla vypracována na téma aplikace polymerních materiálů pro aditivní výrobu tvarových částí vstřikovacích forem a skládá se z teoretické a experimentální části. V teoretické části byl proveden teoretický rozbor a řešerše procesu vstřikování plastů, složení vstřikovací formy, druhy aditivních technologií a materiálů používaných pro tisk aditivních technologií.

V experimentální části bylo potvrzeno, že je možné vytvořit vstřikovací formu obsahující funkční temperační kanály za pomoci FDM tisku. Výsledná kvalita povrchu dutiny vytištěného dílu má v tvarově složitých oblastech poměrně hrubý povrch, které velmi často trpí defekty po tisku, což zhoršuje použití pro výrobu součástí s malými formovacími úhly. Dále bylo sice potvrzeno, že temperační kanály chladí dutinu formy, ale jejich chladicí schopnost je velmi omezená z důvodu poměrně velké vzdálenosti kanálu od dutiny formy. Použitá aditivní technologie a materiál vložky formy, sice dokáže odvádět teplo, ale oproti kovu je jeho tepelná vodivost výrazně horší.

Největším problémem použití této metody pro výrobu vložky formy je nestabilní velikost spékání formy. Poměrně nízká adheze vrstev vložky formy způsobila při vstřikování jejich delaminaci. Životnost vložky formy nebyla schopna splnit požadavek minimálně 100 vstřikovacích cyklů. Při použití minimálního dotlaku byla její životnost okolo 30 vstřikovacích cyklů. Za použití vyššího dotlaku, pro zaručení dostříknutí dílu a odstranění jejich vad, vznikaly výrazné přetoky na dílu, dále se snížila životnost na 15 vstřikovacích cyklů.

Dalším výrazným záporem je doba tisku formy, kdy při výrobě vložky o velikosti 240x200x62 mm by tisk trval okolo 16 dnů, což je velmi dlouhá doba, která se blíží k době tvorby vložky konvenčním způsobem obráběním hliníkového bloku. Z výše uvedených důvodů není tvorba vložky formy daným způsobem vhodná. Při použití jiné aditivní technologie, která je schopna tisknout vodotěsné struktury a netrpí delaminacemi by mohla tvorba vložky formy dosáhnout lepších výsledků.

6. Literatura

- [1] CORANIČ, T. GAŠPAR, Š. 3D tlač vstrekovacích foriem. *Plastics production, Duben 2019, ročník 14, číslo 1, s. 50-51, ISSN 1802-1549*
- [2] BOBEK, Jiří. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. 2015. 14 verze knihy. ISBN: 978-80-88058-65-6. [online]. 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=179-vstrikovaci-formy-pro-zpracovani-termoplastu>
- [3] LENFELD, Petr. Technologie vstřikování. 2015. 20 verze knihy. ISBN: 978-80-88058-74-8. [online]. 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=184-technologie-vstrikovani>
- [4] AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastu. 2015. 16 verze knihy. ISBN: 978-80-88058-77-9. [online]. 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=183-technologie-zpracovani-plastu>
- [5] SEIDL, Martin. Stroje pro zpracování polymerních materiálů. 2015. 19 verze knihy. ISBN: 978-80-88058-71-7. [online]. 2015 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/?book=181-stroje-pro-zpracovani-polymernich-materialu>
- [6] obrázek: Automobilový nárazník [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.autodilyruby.cz/naraznik-predni-pro-lak--bez-zakladniho-laku--skoda-fabia-2-ii--5j---03.07-04.10--skoda-roomster/praktik-2-ii--5j---07.06-04.10-oe-5j0807221>
- [7] obrázek: Běžné plastové díly v domácnosti [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.protofinal.cz/sluzby/vstrikovani-plastu/o-technologie/>
- [8] LENFELD, Petr. Přednášky z předmětu formy pro vstřikování plastů
- [9] obrázek: Jednoduchá dvou desková forma [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: www.expmachining.com/id4.html
- [10] obrázek: Vícepatrová forma na výrobu ramínek [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://stackteck.com/other-high-volume/clothes-hangers/>
- [11] obrázek: Tří desková forma [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.hmdesignzone.in/designs/>

- [12] obrázek: Rámová forma s vložkou [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://mouldsasias.files.wordpress.com/2014/09/injection-moulding.jpg>
- [13] obrázek: Jednonásobná forma na výrobu lopatky ventilátoru [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.oulemold.com/home-appliance-mould/plastic-fan-blade-mould.html>
- [14] obrázek: Vícenásobná vstřikovací forma [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.taiwantrade.com/product/multi-cavity-injection-moulding-tool-1085970.html#>
- [15] obrázek: „Family forma“ na výrobu krabičky s víkem [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.globecorp.com/?q=node/33>
- [16] ŠAFAŘÍK, Miloslav. Nástroje pro tváření kovů a plastů - cvičení. 1991. 1 verze knihy. ISBN: 80-7083-014-X. [cit. 2020-02-03].
- [17] obrázek: [online]. Přehled konstrukce vstřikovací formy dle typu vtokové soustavy [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.plasticmoulds.net/two-plate-moldthree-plate-moldhot-runner-mold.html>
- [18] obrázek: Komplet horkého rozvodu s vyhříváním rozvodem a uzavíratelným vtokem [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.dmeeu.com/cz/news/d/detail/new-zenith-valve-gate-hot-runner-system-improves-thermal-profile-5>
- [19] obrázek: Klasické provedení temperačního rozvodu [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.acomold.com/injection-mold-cooling-channel.html>
- [20] Alternative cooling devices [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://www.dc.engr.scu.edu/cmdoc/dg_doc/develop/design/cooling/31000003.htm
- [20] Měděné slitiny AMPCO a AMPCOLOY [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.mepac.cz/files/katalogy/medene-slitiny-ampco-a-ampcoloy-51-6227.pdf>
- [22] obrázek: Porovnání konvenčního temperačního systému s řešením Corona [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.milacron.com/mblog/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/Conformal-Cooling-768x543.png>

- [23] The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [24] 3D Printing Technology Choice: FDM v/s SLA v/s SLS [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sls/>
- [25] Additive Manufacturing Technologies: An Overview [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>
- [26] Main Components of FDM 3D Printers, 11 Things to Consider When Choosing Your First or Next Desktop FDM 3D Printer [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://my3dconcepts.com/explore/main-components-of-desktop-3d-printers/>
- [27] An in depth look at XJET's NanoParticle Jetting technology for metal and ceramics [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/xjet-nanoparticle-jetting-technology/>
- [28] FREEFORMER Additive manufacturing – a free approach [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/mediathek/prospekte/arburg_freeformer_680836_en_gb/#
- [29] The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
- [30] Inside Metal Additive Manufacturing [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/-functionally-graded-materials-using-additive-manufacturing-to-design-and-tailor-metal-properties>
- [31] 3D Printer Materials Guide [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.3dbeginners.com/3d-printer-materials-guide/>

- [32] 3D-Drucker-Material-Die große Übersicht der Materialien für den 3D-Druck. 3D Grenzenlos Magazin [online]. 2018 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.3d-grenzenlos.de/3d-drucker-material/>
- [33] Aditivni technologie – metody Rapid Prototyping [online]. Brno [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [34] 3D tiskové materiály – jak fungují. 3D tiskárny [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>
- [35] PRŮŠA, Josef. Průvodce materiály. Prusa Research [online]. 2019 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [36] Fenomén dneška se jmenuje 3D tisk. MKF [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/info/prehled-a-popis-materialu-pro-3d-tisk>
- [37] obrázek: Přehled nejpoužívanějších aditivních technologií [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/aniwaa-reports-first-market-data-analysis-on-900-3d-printers-database-62941/>
- [38] FIKKEROVA, Kamila. Výzkum vlivu orientace vrstev při 3D tisku technologií Freeformer z materiálu PLA. Liberec, 2019. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [39] Proto-pasta HTPLA materials [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.proto-pasta.com/products/copper-metal-composite-htpla>

Seznam příloh

- 1) Materiálový list vstřikovaného dílu
- 2) Materiálový list tiskové struny
- 3) Nastavení parametrů tisku dle výrobce
- 4) Nastavení tisku po optimalizaci
- 5) Naměřené hodnoty etalonu
- 6) Technický list opravného tmelu
- 7) Parametry nastavení vstřikování
- 8) Naměřené rozměry dílu (první měření)
- 9) Naměřené hodnoty dílu (druhé měření)

Příloha č. 1 Materiálový list vstřikovaného dílu



SABIC® PPcompound 8750U Provisional

PP compound MF impact modified for Automotive injection moulding

Description:

SABIC® PPcompound 8750U is a development grade, elastomer-modified mineral filled Polypropylene for unpainted automotive exterior applications. The grade is UV stabilized and has been designed to combine a good performance profile with good processing.

SABIC® PPcompound 8750U is a designated automotive grade.

IMDS ID: 445154355

Typical values

Revision 20130705

Properties	Unit (SI)	Values	Test methods
Polymer properties			
Melt flow rate (MFR) at 230 °C and 2.16 kg	dg/min	18	ISO 1133
Density	kg/m ³	1010	ISO 1183
Coeff. of linear thermal expansion ¹⁾ 23 °C to 80 °C	µm/mK	80	ASTM D 696
-30 °C to 30 °C	µm/mK	60	
Mould shrinkage ¹⁾ 24 hours after injection moulding	%	0.6	SABIC method
Mechanical properties ¹⁾			
Tensile test ²⁾			ISO 527
stress at yield	MPa	20	
stress at break	MPa	13.5	
strain at break	%	80	
Flexural test ³⁾			ASTM D 790
Flexural modulus	MPa	1850	
Izod impact notched			ISO 180/4A
at 23 °C	kJ/m ²	50	
at 0 °C	kJ/m ²	20	
at -20 °C	kJ/m ²	7	
Charpy impact notched			ISO 179/1eA
at 23 °C	kJ/m ²	-	
Charpy impact unnotched			ISO 179/1eU
at -40 °C	kJ/m ²	-	
Hardness Shore D	-	-	ISO 868
Thermal properties ¹⁾			
Heat deflection temperature at 0.45 MPa (HDT/B)	°C	105	ISO 75/B
Vicat softening temperature at 10 N (VST/A)	°C	-	ISO 306/A

1) All measurements on injection molded samples.

2) Speed of testing: 50 mm/min; Specimen ISO 527/1A

3) 3-point loading

Příloha č. 2 Materiálový list tiskové struny

Proto-pasta

Technical Data Sheet Rev .1

Brass Fill, Bronze Fill, Copper Fill HTPLA

Brass, Bronze, and Copper HTPLA print like plastic but finish like real metal for beautiful, durable parts from most standard 3D printers. These three metal composites can be heat treated to firm up parts and hold shape up to near melting (175C).

Material Properties

Properties	Value/Description
Base material	Heat treatable PLA w/ high temp resistance
Characteristics	low odor, non-toxic, renewably sourced
Molecular structure	Amorphous or partially crystalline (<i>Amorphous as printed, part crystalline when heat-treated</i>) (<i>Melting resets crystalline structure to amorphous state</i>)
Additives	Metal Powder
Max particle size	250 microns
Density	approx. 2.3 g/cc
Length	approx. 194 m/kg (1.75 mm) & 72 m/kg (2.85 mm)
Min bend diameter	30 mm (1.75 mm) & 55 mm (2.85 mm)
Glass transition (Tg) onset	approx. 60 deg C (140 deg F)
Melt point (Tm) onset	approx. 155 deg C (310 deg F)
Max use	Tg for amorphous, Tm for crystalline

Use limit is geometry, load & condition dependent

Print Settings

(Based on Ultimaker s5 .15mm Profile)

Setting	Value
Nozzle Temperature [°C]	195
Heated Bed Temperature [°C]	60
Print Speed [mm/s]	20-30
Flow Rate/Extrusion Multiplier [%]	100
Extrusion Width [mm]	.65 (.05mm larger than nozzle size)
Volume Flow Rate [mm³/s]	2-3

Heat Treating (for heat-treating only)

HTPLA is a semi-crystalline grade of PLA optimized for heat-treating for higher temperature use. Prior to printing, HTPLA parts should be scaled in the slicer to compensate for shrinkage when heat treating.

(Please note that all values for heat-treating are process dependent and may vary between users)

Part Axis	Percentage
Scale Values (x/y-axis)	101.5%
Scale Values (z-axis)	99%

(a large range of temperatures & times can yield acceptable results)

Typical Heat Treat Temperature	Typical Heat Treat Time
95-110 °C	10+ minutes

For a more in-depth look at brass, bronze, and copper please view proto-pasta.com/copper-alloys
Results may vary based on print settings as well as print quality

Příloha č. 3 Nastavení parametrů tisku dle výrobce

Parametry nastavení	Hodnota
Výška vrstvy	0,15 mm
Výška první vrstvy	0,15 mm
Počet perimetrů svislé stěny	5
Počet plných vrchních vodorovných vrstev	2
Počet plných spodních vodorovných vrstev	3
Hustota výplně	100
Vzor výplně	Přímočaré
Úhel výplně	45°
Použití podpěr	Ne
Rychlost pohybu tisku pro perimetry	40 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro malé perimetry	20 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro vnější perimetry	20 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro výplň	90 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro vrchní výplň	40 mm/s
Rychlost pohybu tisk pro výplň tenkých stěn	40 mm/s
Netiskové rychlosti	200 mm/s
Rychlost první vrstvy	40 mm/s
Výchozí šířka extruze	0,5 mm
Šířka první vrstvy	0,5 mm
Šířka perimetrů	0,5 mm
Šířka vnějších perimetrů	0,5 mm
Šířka výplně	0,8 mm
Šířka vrchní plné výplně	0,5 mm
Průměr filamentu	1,75mm
Teplota tisku první vrstvy	220°C
Teplota tisku ostatních vrstev	220°C
Teplota tiskové podložky	60°C
Materiál tiskové podložky	Ocelový plát s PEI povrchem
Chlazení ventilátorem	Ano 100%

Příloha č. 4 Parametry nastavení tisku po optimalizaci

Parametry nastavení	Hodnota
Výška vrstvy	0,2 mm
Výška první vrstvy	0,2mm
Počet perimetrů svislé stěny	10
Počet plných vrchních vodorovných vrstev	4
Počet plných spodních vodorovných vrstev	4
Hustota výplně	100
Vzor výplně	Přímočaré
Úhel výplně	45°
Použití podpěr	Ne
Rychlost pohybu tisku pro perimetry	30 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro malé perimetry	30 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro vnější perimetry	30 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro výplň	65 mm/s
Rychlost pohybu tisku pro vrchní výplň	65 mm/s
Rychlost pohybu tisk pro výplň tenkých stěn	30 mm/s
Netiskové rychlosti	200 mm/s
Rychlost první vrstvy	30 mm/s
Výchozí šířka extruze	0,7 mm
Šířka první vrstvy	0%
Šířka perimetrů	150%
Šířka vnějších perimetrů	0%
Šířka výplně	150%
Šířka vrchní plné výplně	125%
Průměr filamentu	1,75mm
Teplota tisku první vrstvy	240°C
Teplota tisku ostatních vrstev	240°C
Teplota tiskové podložky	60°C
Materiál tiskové podložky	Ocelový plát s PEI povrchem
Chlazení ventilátorem	Ne

Příloha č. 5 Naměřené hodnoty etalonu

Měřený rozměr A			
Nominální hodnota:		20 mm	
Č. etalonu	Po tisku [mm]	Po spékání [mm]	Velikost změny rozměrů [%]
1	20,02	19,69	-1,68
2	19,96	19,67	-1,47
3	20,01	19,68	-1,68
4	19,98	19,72	-1,32
5	19,99	19,7	-1,47
6	19,98	19,72	-1,32
7	20,06	19,74	-1,62
8	19,94	19,65	-1,48
9	19,99	19,67	-1,63
10	20,01	19,69	-1,63
\bar{x}	19,99	19,69	-1,53
s	0,03	0,03	0,13
CV [%]	0,16	0,13	-

Měřený rozměr B			
Nominální hodnota:		10 mm	
Č. etalonu	Po tisku [mm]	Po spékání [mm]	Velikost změny rozměrů [%]
1	10,01	9,84	-1,73
2	10,03	9,89	-1,42
3	10,02	9,85	-1,73
4	10,00	9,85	-1,52
5	10,01	9,84	-1,73
6	9,96	9,81	-1,53
7	10,03	9,88	-1,52
8	9,99	9,83	-1,63
9	10,01	9,86	-1,52
10	9,95	9,79	-1,63
\bar{x}	9,92	10,04	1,15
s	0,03	0,03	0,09
CV [%]	0,30	0,31	-

Příloha č. 5 Naměřené hodnoty etalonu

Měřený rozměr C			
Nominální hodnota:		10 mm	
Č. etalonu	Po tisku [mm]	Po spékání [mm]	Velikost změny rozměrů [%]
1	9,99	10,10	1,09
2	9,95	10,05	1,00
3	9,93	10,06	1,29
4	9,91	10,03	1,20
5	9,93	10,05	1,19
6	9,89	10,01	1,20
7	9,9	10,01	1,10
8	9,92	10,04	1,20
9	9,91	10,03	1,20
10	9,88	9,98	1,00
\bar{x}	10,00	9,84	-1,60
s	0,03	0,03	0,10
CV [%]	0,26	0,29	-

Příloha č. 6 Technický list opravného tmelu

TECHNICKÉ ÚDAJE

Doba zpracování : 1,5 - 2 hodiny při 20°C

Skladovatelnost : minimálně 6 měsíců, skladovat mezi +15 až +25°C

Tvrdost Shore D : 80

Úplné vytvrzení : 24 hodin

Pevnost v tahu na stříh na oceli : 6.2 MN/m²

Teplotní hranice /omezení/ : 260°C nepřetržitě , až 300°C krátkodobě

Chemická odolnost : odolný hydrokarbonátům, ketonům, alkoholům, esterům, halokarbonátům, vodním solným roztokům a zředěným kyselinám a zásadám

Elektrická odolnost : 30 000 Megaohmů

Pevnost v tlaku : 90N/mm² ASTM 695 M

Dielektrická pevnost: 300V/mil.

DŮLEŽITÁ POZNÁMKA

Prodejce neodpovídá za škody vzniklé nevhodným použitím výrobku.

Pozorně čtěte technické listy výrobků a dbejte všech doporučení a návrhů. Berte ohled na používání výrobků vyráběných bez záruky, pokud podmínky užívání jsou společností nekontrolovatelné.

Povinností zákazníka je, aby se ujistil, zda vybraný produkt vyhovuje účelu, ke kterému jej chce použít, a aby aktuální podmínky použití vyhovovaly.

ZDRAVÍ A BEZPEČNOST

Titanová tyčinka obsahuje epoxidovou pryskyřici a tužidla, která mohou způsobit podráždění citlivé pokožky. Proto se doporučuje, aby jste si ihned po práci umyli ruce za použití čističe na ruce nebo mýdla s vodou. Nedávejte ocelovou tyčinku k potravinám ani k nádobí.

Pečlivě čtěte bezpečnostní list M 8110.

Dodává :



HF MARKET s.r.o., PLEŠNICE 25

Tel. 377 279 254-55

Fax.: 377279 260

E-mail: hfmarket@hfmarket.cz

www.hfmarket.cz



Příloha č. 7 Nastavení vstřikování

Parametry nastavení	Hodnota
Topení válce 1	220 °C
Topení válce 2	215 °C
Topení válce 3	215°C
Topení válce 4	210 °C
Topení válce 5	200 °C
Topení válce 6	190 °C
Uzavírací síla	1500kN
Doba kontroly ochrany formy	2s
Start kontroly ochrany formy	20mm
Topení formy 1	230°C
Topení formy 2	230°C
Vstřikovací rychlost	35mm/s
Zdvih dávkování	32,14 mm
Pozice při přepnutí	24,13 mm
Doba dotlaku	2 s
Velikost dotlaku	2,38 MPa
Kontrola polštáře	22,89 mm
Doba chlazení	120s
Teplota temperačního média	40°C
Vstřikovací tlak	1,4 MPa
Doba vstřikování	0,37 s
Tlak temperační kapaliny	0,1 MPa

Příloha č. 8 Naměřené rozměry dílu (první zkoušení)

Měřený rozměr po 24h						
Č.	A [mm]	Změna rozměru A [%]	B [mm]	Změna rozměru B [%]	C [mm]	Změna rozměru C [%]
1	45,72	1,57	15,32	2,09	14,54	-3,16
2	45,69	1,51	15,38	2,47	14,65	-2,39
3	45,87	1,90	15,31	2,02	14,78	-1,49
4	45,78	1,70	15,32	2,09	14,80	-1,35
5	45,82	1,79	15,28	1,83	14,55	-3,09
6	45,94	2,05	15,34	2,22	14,48	-3,59
7	45,81	1,77	15,25	1,64	14,80	-1,35
8	45,90	1,96	15,18	1,19	14,44	-3,88
9	46,07	2,32	15,13	0,86	14,70	-2,04
10	45,86	1,88	15,21	1,38	14,52	-3,31
11	45,71	1,55	15,17	1,12	14,80	-1,35
12	45,78	1,70	15,18	1,19	14,62	-2,60
13	45,65	1,42	15,21	1,38	14,56	-3,02
14	45,73	1,60	15,16	1,06	14,47	-3,66
15	45,66	1,45	15,23	1,51	14,42	-4,02
16	45,83	1,81	15,31	2,02	14,51	-3,38
17	45,60	1,32	15,18	1,19	14,53	-3,23
18	45,71	1,55	15,25	1,64	14,87	-0,87
19	45,81	1,77	15,30	1,96	14,75	-1,69
20	45,83	1,81	15,28	1,83	14,46	-3,73
21	45,65	1,42	15,20	1,32	14,57	-2,95
22	45,80	1,75	15,29	1,90	14,68	-2,18
23	45,60	1,32	15,30	1,96	14,81	-1,28
24	45,73	1,60	15,14	0,92	14,57	-2,95
25	45,62	1,36	15,16	1,06	14,49	-3,52
\bar{x}	45,77	1,67	15,24	1,59	14,61	-2,64
s	0,11	0,24	0,07	0,45	0,13	0,94
CV [%]	0,24	-	0,45	-	0,92	-

Příloha č. 9 Naměřené rozměry dílu (druhé zkoušení)

Měřený rozměr po 24h						
Č.	A [mm]	Změna rozměru A [%]	B [mm]	Změna rozměru B [%]	C [mm]	Změna rozměru C [%]
1	44,92	-0,18	14,97	-0,20	14,89	-0,74
2	44,97	-0,07	14,93	-0,47	14,92	-0,54
3	45,05	0,11	14,94	-0,40	15,00	0,00
4	45,03	0,07	14,89	-0,74	14,97	-0,20
5	45,01	0,02	15,05	0,33	15,01	0,07
6	45,10	0,22	14,99	-0,07	15,06	0,40
7	44,92	-0,18	15,09	0,60	15,03	0,20
\bar{x}	45,00	0,00	14,98	-0,14	14,98	-0,12
s	0,06	0,14	0,06	0,43	0,06	0,37
CV [%]	0,14	-	0,43	-	0,37	-